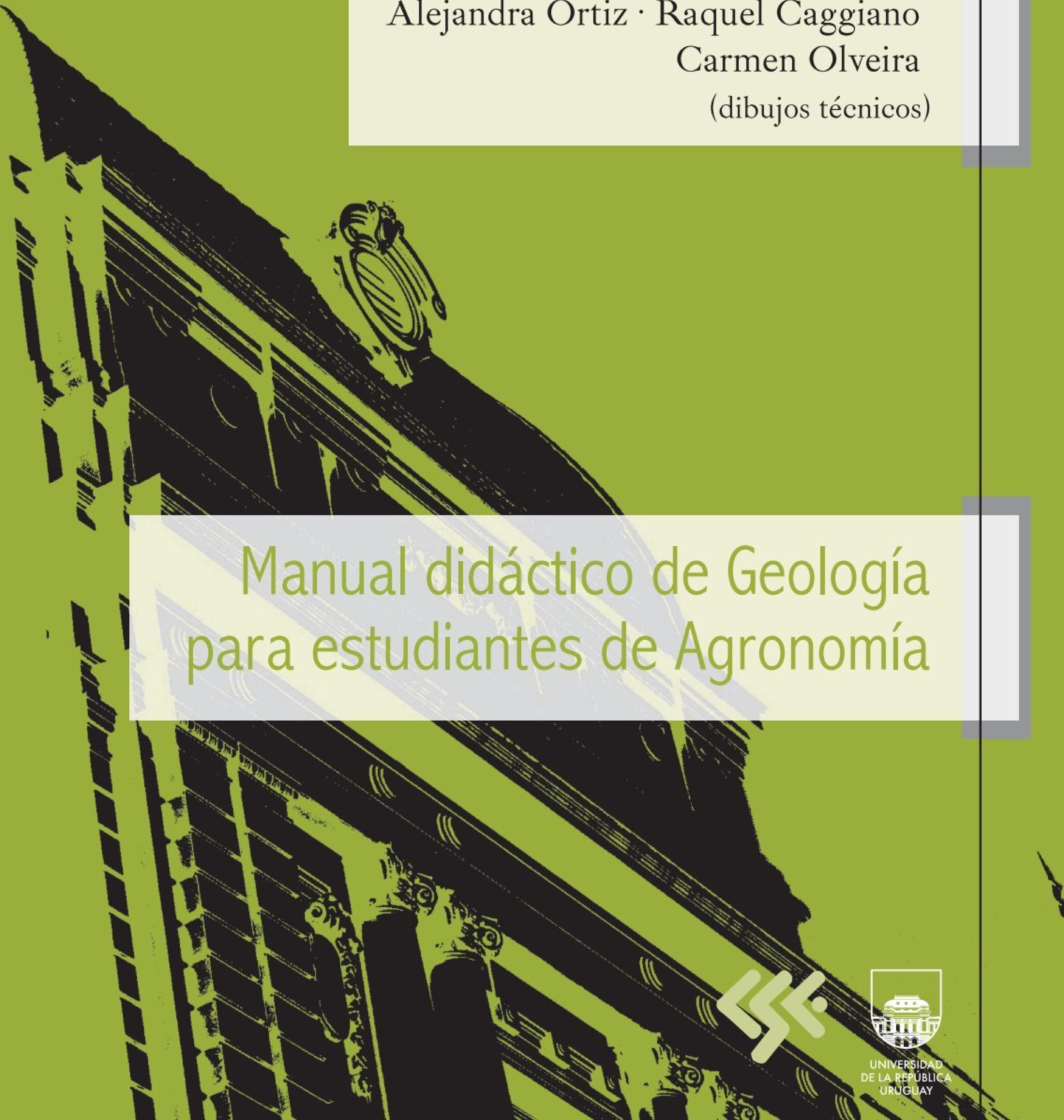


Jorge Bossi
(coordinador)
Alejandra Ortiz · Raquel Caggiano
Carmen Olveira
(dibujos técnicos)

Manual didáctico de Geología para estudiantes de Agronomía

UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Jorge Bossi
(coordinador)
Alejandra Ortiz · Raquel Caggiano
Carmen Olveira
(dibujos técnicos)

Manual didáctico de Geología para estudiantes de Agronomía

La publicación de este libro fue realizada con el apoyo de la Comisión Sectorial de Enseñanza (CSE) de la Universidad de la República.

© Los autores, 2011

© Universidad de la República

Ilustraciones técnicas: Carmen Olveira

Departamento de Publicaciones, Unidad de Comunicación de la Universidad de la República (UCUR)
José Enrique Rodó 1827 - Montevideo CP: 11200
Tels.: (+598) 2408 57 14 - (+598) 2408 29 06
Telefax: (+598) 2409 77 20
www.universidadur.edu.uy/bibliotecas/dpto_publicaciones.htm
infoed@edic.edu.uy

ISBN: 978-9974-0-0763-5

Contenido

Prefacio 9

Presentación 13

Introducción 15

Agradecimientos 17

Capítulo 1. Documentos de base, cartografía y aerofotolectura 19
- 1.1. Documentos cartográficos 19
- 1.2. Documentos fotográficos 21
- 1.3. Sistemas de coordenadas 22
- 1.4. Cartografía 24
- 1.5. Aerofotolectura 31
- 1.6. Ejercicios 35
- Bibliografía recomendada 38

Capítulo 2. Minerales primarios 39
- 2.1.Cristaloquímica 39
- 2.2. Clasificación de silicatos 41
- 2.3. Identificación 44
- 2.4. Ejercicios 46
- Bibliografía recomendada: 47

Capítulo 3. Rocas ígneas 49
- 3.1. Clasificación de las rocas ígneas 51
- 3.2. Clasificación química de las rocas ígneas 52
- 3.3. Estructuras geológicas en rocas ígneas 52
- 3.4. Ejercicios 55
- Bibliografía recomendada 56

Capítulo 4. Rocas sedimentarias 57
- 4.1. Clasificación de rocas sedimentarias 57
- 4.2. Estructuras internas en rocas sedimentarias 60
- 4.3. Estructuras geológicas en rocas sedimentarias 61
- 4.4. Ejercicios 62
- Bibliografía recomendada: 62

Capítulo 5. Rocas metamórficas 63
- 5.1. Tipos de metamorfismo 63
- 5.2. Rocas metamórficas de importancia agronómica 64
- 5.3. Estructuras geológicas de las rocas metamórficas 65
- 5.4. Ejercicios 68
- Bibliografía recomendada 68

Capítulo 6. Meteorización 69
6.1. Agentes de meteorización 70
6.2. Alterabilidad de minerales 72
6.3. Minerales secundarios 78
6.4. Ejercicios 87
Bibliografía recomendada: 87

Capítulo 7. Geología del Uruguay 89
7.1. Secuencia estratigráfica 91
7.2. Unidades tectonoestratigráficas 92
7.3. Unidades litoestratigráficas 94
7.4. Ejercicios 111
Bibliografía recomendada: 115

Capítulo 8. Hidrogeología 117
8.1. Introducción 117
8.2. Acuíferos 119
8.3. Regionalización hidrogeológia del Uruguay (modificado de Morales, 1996) 138
8.4. Explotación 144
8.5. Calidad de las aguas 147
8.6. Ejercicios 150
Bibliografía recomendada (por orden de importancia): 152

Bibliografía 153

Índice de tablas

Tabla 1. Importancia relativa de los elementos que contiene la corteza terrestre ______ 40
Tabla 2. Radio iónico, potencial iónico y fuerza electrostática de enlace de los elementos de importancia agronómica ______ 40
Tabla 3. Claves para la determinación de los minerales de importancia agronómica ______ 46
Tabla 4. Clasificación de las rocas ígneas según su composición mineralógica ______ 51
Tabla 5. Clasificación de rocas detríticas en función del tamaño de grano ______ 56
Tabla 6. Rocas resultantes según grado de metamorfismo ______ 64
Tabla 7. Valores de Σ f.e.e de los principales minerales formadores de rocas ______ 74
Tabla 8. Diferente Σ f.e.e según mineral ______ 74
Tabla 9. Clasificación de los minerales arcillosos según estructura y cationes dominantes ______ 82
Tabla 10. Capacidad de intercambio catiónico de los minerales arcillosos ______ 84
Tabla 11. Estados del hierro en diversos minerales ______ 86
Tabla 12. Permeabilidad según tipo litológico ______ 119
Tabla 13. Datos hidrogeológicos del acuífero Raigón ______ 125
Tabla 14. Columna estratigráfica de las formaciones que componen el Acuífero Guaraní ______ 127
Tabla 15. Reservas permanentes del acuífero Guaraní ______ 127
Tabla 16. Diferentes transmisividades según espesor para el Acuífero Cerrezuelo. ______ 131
Tabla 17. Características de los diferentes acuíferos ______ 148

Índice de figuras

Figura 1. Distribución de segmentos, sectores y hojas topográficas del Plan Cartográfico Nacional ______ 20
Figura 2. Ubicación de la totalidad de las hojas topográficas del Plan Cartográfico Nacional ______ 21
Figura 3. Latitud y longitud ______ 22
Figura 4. Distancia entre dos puntos aplicando Pitágoras ______ 24
Figura 5. Curvas de nivel a escala 1/500.000, cada 50 m de altura ______ 26
Figura 6. Curvas de nivel cada 10 m de altura ______ 26
Figura 7. Corte topográfico. Escala 1/10.000 ______ 27
Figura 8. Corte topográfico. Escala 1/10.000 ______ 27
Figura 9. Corte topográfico. Escala 1/10.000 ______ 28
Figura 10. Corte topográfico. Escala 1/10.000 ______ 28
Figura 11. Corte topográfico. Escala 1/10.000 ______ 28
Figura 12. Corte topográfico ______ 29
Figura 13. Cálculo de rumbo y distancia ______ 29
Figura 14. Otra técnica para determinar rumbo ______ 30
Figura 15. Retículas transparentes de diferentes tamaños ______ 30
Figura 16. Ejemplo de cálculo de área con papel cuadriculado ______ 31

Figura 17. Dirección del vuelo mostrando el solapamiento de las fotos consecutivas 32
Figura 18. Información de la foto aérea 32
Figura 19. Relaciones geométricas en la foto aérea 33
Diagrama 1. Clasificación de los feldespatos 44
Figura 20. Distribución de los oxígenos en las diferentes estructuras minerales 44
Diagrama 2. Series isomorfas de algunos minerales 45
Figura 21. Subducción y colisión. 50
Figura 22. Diferentes condiciones de cristalización del magma 50
Figura 23. Representación esquemática de los batolitos 53
Figura 24. Representación esquemática de los lacolitos 53
Figura 25. Facolitos y filón capa 53
Figura 26. Coladas espesas de riolitas en Uruguay 53
Figura 27. Esquema de derrames basálticos 54
Figura 28. Vista de derrames basálticos en fotos aéreas 54
Figura 29. Representación esquemática de los filones y vista de los mismos en foto aérea 55
Figura 30. Selección en rocas detríticas 59
Figura 31. Redondez y esfericidad 59
Figura 32. Estructuras internas de las rocas sedimentarias 61
Figura 33. estructuras geológicas de las rocas sedimentarias 61
Figura 34. Texturas de las rocas metamórficas 64
Figura 35. Pliegues en rocas metamórficas 65
Figura 36. Detalle de un pliegue. n30e 45 e. 66
Figura 37. Rumbo y buzamiento. Radios de curvatura, buzamiento de charnela y cartas resultantes. 66
Figura 38. Radio de curvatura 67
Figura 39. Charnela horizontal, buzando al n y buzando al s 67
Figura 40. Gráfica de condiciones de Eh y pH para definir campos de estabilidad de los componentes de hierro 71
Figura 41. Eesquema espacial del ión H3O+ 72
Figura 42. Mecanismo de reemplazo de cationes por H+ en las estructuras minerales 72
Diagrama 3. Esquema de alterabilidad de los minerales 73
Figura 43. Serie de Goldich 75
Figura 44. Ejemplo de reemplazo de Fe++ por H+ 75
Figura 45. Distribución global de los distintos tipos de procesos de meteorización, según Pedro (1968) 77
Figura 46. Estructura interna de la caolinita 80
Figura 47. Estructura interna de la illita 80
Figura 48. Estructura interna de la montmorillonita 81
Figura 49. Estructura tridimensional de la clorita 81
Figura 50. Causas del comportamiento diferencial entre illita y montmorillonita 83
Figura 51. Comportamiento del calcio en función del pH 85
Figura 52. Eh en función del pH 86
Figura 53. Estratigrafía mundial 90
Figura 54. Columna estratigráfica del Uruguay 91
Figura 55. Terrenos en Uruguay 92
Figura 56. Área de afloramiento del Grupo Durazno 95
Figura 57. Área de afloramiento del Supergrupo Gondwana 97
Figura 58. Área de afloramiento del Grupo Batoví Dorado 99

Figura 59. Área de afloramiento del Magmatismo Mesozoico 100
Figura 60. Formaciones del grupo Arapey 101
Figura 61. Área de depósito de la Fm. Migues 105
Figura 62. Área de afloramiento del Grupo Paysandú 106
Figura 63. Área de afloramiento de la Fm. Fray Bentos 108
Figura 64. Área de afloramiento de los Sedimentos Cenozoicos 111
Figura 65. Fracciones granulométricas y porosidad 117
Figura 66. Porosidad efectiva 118
Figura 67. Cilindro de Darcy 119
Figura 68. Nivel piezométrico 120
Figura 69. Área de confinamiento y recarga de un acuífero 121
Figura 70. Corte que muestra los distintos niveles de confinamiento 122
Figura 71. Área de los acuíferos porosos que presentan desarrollo regional 122
Figura 72. Perfil que indica los miembros de la Fm. Raigón 123
Figura 73. Ubicación del acuífero Raigón 123
Figura 74. Pozos de la zona de Libertad y Rodríguez 124
Figura 75. Límite tentativo del acuífero Guaraní en Uruguay 126
Figura 76. Espesores de basalto y gradientes hidráulicos del Acuífero Guaraní 127
Figura 77. Diagrama de Piper 128
Figura 78. Confinamiento del Acuífero Chuy por la Fm. Dolores 132
Figura 79. Área de los acuíferos de fisura 133
Figura 80. Pozo productivo que atraviesa varias fisuras 133
Figura 81. Carta y corte indicando pozos positivos y negativos 134
Figura 82. Acuíferos kársticos 134
Figura 83. Zonas con carbonatos en el Terreno Nico Pérez 135
Figura 84. Regionalización hidrogeológica del Uruguay 136
Figura 85. Pozo brocal 142
Figura 86. Pozo artesiano 143
Figura 87. Sello sanitario y perímetro de protección 144
Figura 88. Clasificación de aguas para riego 147

Julia Leymonié Sáenz[1]

Prefacio

> La educación superior ha dado sobradas pruebas de su viabilidad a lo largo de los siglos y de su capacidad para transformarse y propiciar el cambio y el progreso de la sociedad. Dado el alcance y el ritmo de las transformaciones, la sociedad cada vez tiende más a fundarse en el conocimiento, razón de que la educación superior y la investigación formen hoy en día parte fundamental del desarrollo cultural, socio-económico y ecológicamente sostenible de los individuos, las comunidades y las naciones. Por consiguiente, y dado que tiene que hacer frente a imponentes desafíos, la propia educación superior ha de emprender latransformación y la renovación más radicales que jamás haya tenidopor delante, de forma que la sociedad contemporánea, que en la actualidad vive una profunda crisis de valores, pueda trascender las consideraciones meramente económicas y asumir dimensiones de moralidad y espiritualidad más arraigadas.
>
> *Preámbulo de la Declaración Mundial sobre la Educación Superior en el Siglo XXI: Visión y Acción.* París, octubre de 1998.

Ya nadie discute que los escenarios globalizados del siglo XXI exigen un nuevo perfil de profesional universitario. Tampoco nadie discute que es imposible saber con precisión cuáles serán las tareas que un egresado universitario deberá realizar dentro de diez o quince años. Bauman, filósofo polaco contemporáneo, dice que la educación a lo largo de la historia siempre supo adecuarse a las cambiantes realidades, pero que nunca antes se enfrentó con un «punto de vista semejante». Hoy en día, las mayores posibilidades de acceso a la información permiten a las personas comprender la influencia que los fenómenos políticos, económicos, culturales y naturales tienen sobre su vida cotidiana. El capital cultural, la creatividad, el talento, tienen actualmente más valor que una capacidad laboral específica. «La libertad de autocreación no había tenido nunca antes un alcance tan impresionante, a un tiempo emocionante y aterrador».[2]

---

[1] Licenciada en Ciencias Biológicas, Facultad de Humanidades y Ciencias. Magíster en Educación, Universidad Católica del Uruguay. Especialización en Didáctica de las Ciencias, Universidad de Lovaina. Especialización en Enseñanza para la Comprensión, Harvard Graduate School of Education (Proyect Cero). Directora del Programa de Mejoramiento de la Enseñanza Universitaria de la Facultad de Ciencias Humanas de la Universidad Católica del Uruguay e integrante del Equipo Docente del Instituto de Evaluación Educativa.
Directora y profesora de la Maestría en Didáctica de la Educación Superior en el Instituto Universitario CLAEH e integrante del Equipo Docente del Programa Educación del CLAEH.
Desarrolla investigaciones en el área de la enseñanza universitaria y de la Enseñanza para la Comprensión. Participa en seminarios de formación docente dentro y fuera del país. Ha escrito libros (como autora y coautora) y publicaciones en revistas. Es consultora de Unesco-OREALC y consultora nacional para el BID-Montevideo en temas de evaluación.

Todos somos conscientes de que las tareas que los profesionales universitarios deben asumir en sus respectivos campos laborales exigen hoy el manejo de competencias tales como autonomía, manejo flexible del conocimiento, toma de decisiones, capacidad de trabajar en equipo, creatividad y predisposición hacia la formación permanente. La adquisición y desarrollo de estas competencias aún están ausentes en la mayoría de los currículos de las instituciones educativas uruguayas. Los jóvenes profesionales deben, además, tener la capacidad de comprender las problemáticas de nuestras sociedades latinoamericanas, trabajar en las diversidades de la realidad, comprometerse con necesidades, posibilidades, creencias y comportamientos extremadamente heterogéneos. Estas son capacidades, habilidades y actitudes que los estudiantes deben desarrollar en su paso por el sistema educativo, en particular por la universidad. «Los docentes, formados en escenarios de solidez, nos enfrentamos al desafío de educar niños y jóvenes que se van a desempeñar en una sociedad caracterizada por la incertidumbre, la innovación y la fluidez».

Alcanzar estas metas educativas depende de los cambios que la universidad como institución debe asumir. Entre otros, diversificar las metodologías de enseñanza con las cuales se desarrollan los contenidos a enseñar. Las investigaciones señalan que el éxito de las innovaciones educativas pasa por el compromiso del profesorado con dichos cambios. Los profesores deben sentirse implicados, comprometidos y motivados hacia las nuevas perspectivas del enseñar.

> Así como la investigación en la universidad se desarrolla necesariamente en un espacio de abierto intercambio y se nutre de interacciones y cruces de influencias, la actividad docente, en cambio, suele desarrollarse en un ámbito privado y reviste un alto grado de discrecionalidad: «¿qué ocurre detrás de la puerta del salón de clase?» es una pregunta difícil de responder para cualquiera que se encuentre del lado de afuera.

Las nuevas perspectivas de la enseñanza universitaria señalan cambios que van en el sentido de «una enseñanza más centrada en el aprendizaje que en el profesor como trasmisor de información: menos horas lectivas, más trabajo y estudio independiente del alumno, evaluación de competencias sin limitarnos a los exámenes más convencionales de conocimiento.»[3]

---

[2] BAUMAN, Zygmunt, *Mundo consumo. Ética del individuo en la aldea global.* Buenos Aires: Paidós, 2010, p. 42.

[3] MORALES VALLEJO, Pedro, «Nuevos roles de profesores y alumnos, nuevas formas de enseñar y de aprender». En: Leonor PRIETO NAVARRO (Ed.): *La enseñanza universitaria centrada en el aprendizaje.* Barcelona: Octaedro, 2008, p. 19.

La construcción colectiva de los materiales didácticos para colaborar en la mejora de los aprendizajes de los estudiantes y estimular su capacidad de aprender autónomamente, en el marco del trabajo en equipo de los docentes, es una evidencia de compromiso profesional y se refiere a uno de los aspectos del perfil del docente que aspiramos a tener hoy en nuestras universidades. El artículo 10 de la *Declaración mundial sobre Educación Superior en el siglo XXI* señala que es necesario establecer directivas claras sobre el perfil de los docentes de la educación superior y que ellos «deberían ocuparse sobre todo, hoy en día, de enseñar a sus alumnos a aprender y a tomar iniciativas, y no a ser, únicamente, pozos de ciencia». También se promovía, desde este documento, la actualización y mejora de las competencias pedagógicas de los equipos docentes, estimulando la innovación permanente en los planes de estudio y los métodos de enseñanza y aprendizaje.

El *Manual de geología para estudiantes de agronomía*, creado colectivamente por un equipo docente preocupado por la formación profesional de sus estudiantes, constituye un material que va en la dirección de todas estas consideraciones antes realizadas.

> el profesor ha de ser un conocedor de la disciplina que desarrolla, un especialista en el campo del saber, permanentemente abierto a la investigación y a la actualización del conocimiento. Pero ha de saber, también, qué es lo que sucede en el aula, *cómo aprenden los alumnos*, cómo se puede organizar para ello el espacio y el tiempo, qué estrategias de intervención pueden ser más oportunas en ese determinado contexto.[4]

La capacidad para identificar las necesidades de los estudiantes, la intencionalidad de colaborar en la mejora de los mismos y obrar en consecuencia, tal como el propio equipo de docentes de Geología lo manifiesta en la presentación del manual, muestra claramente un rasgo del nuevo perfil de docente universitario del siglo XXI.

Es, entonces, de profundo valor la iniciativa por desarrollar este material didáctico, evidencia de la importancia que este grupo de docentes otorga a la enseñanza como *orientación y guía* más que como mera transmisión de conocimientos. Este producto tiene como valor adicional el de haber merecido la financiación de la Comisión Sectorial de Enseñanza de la Universidad de la República, que viene trabajando desde hace ya muchos años por la mejora de las prácticas docentes, y que se destaca por promover el desarrollo de emprendimientos de gran importancia para el cuerpo docente universitario y para la comunidad educativa en general.

---

[4] SANTOS GUERRA, Miguel Ángel, «Criterios de referencia sobre calidad del proceso de enseñanza y aprendizaje en la universidad.» En: *Primeras jornadas nacionales de didáctica universitaria.* Madrid: Consejo de Universidades, 1990, p. 51.

Presentación

Desde 1962 el Grupo de Geología mostró que el ingeniero agrónomo debía tener conocimientos geológicos profundos, incluyendo capacidad de cartografía, para definir la verdadera influencia del subsuelo en la generación del suelo que lo cubría.

Las características particulares de Uruguay, con clima templado en régimen isohigro actual y topografía de pendientes suaves, apuntaban a la geología como factor importante o decisivo de las diferencias de las asociaciones de suelo, la geomorfología, el paisaje y la vegetación nativa.

Sin embargo, no era de interés conocer todo lo que incluían los libros de mineralogía, petrología o geología, que abundaban en la biblioteca de entonces porque, de los 2800 minerales conocidos, se necesitaban identificar ocho o diez, y lo mismo ocurría para las rocas. La geología necesaria para la agronomía tenía que apuntar a minerales y rocas abundantes que ocuparan grandes áreas del país, fenómenos de meteorización, minerales arcillosos y aguas subterráneas.

Las necesidades teóricas específicas se escribieron en el primer cuaderno que publicó la facultad que se denominó *Introducción a un curso de geología,* recalcando que era un curso orientado a fines específicos y distintos a los convencionales.

El curso pasó de estudiar 46 minerales a reconocer doce, y las rocas de la colección Krantz se remplazaron por muestras uruguayas, ayudado por Roberto Saccone y Natalio Steinfeld.

El apoyo de la facultad y de María Rosa Capo permitieron perfeccionar el método, elaborándose cuadernos de mineralogía y rocas con detalle, hasta lograr publicar en 1974 el curso completo. Cuando la universidad fue intervenida, en época dictatorial, el grupo fue expulsado de la institución, retomando su trabajo en 1986 tras la recuperación democrática. Sin embargo, al eliminar el curso de Geología en 1988 no se siguió avanzando y hoy no queda ni siquiera registro completo de esa obra. Cuando en 1991 se reconoce la necesidad de conocimientos de geología en Agronomía se retomaron algunos temas, pero el mayor esfuerzo debió volcarse a elaborar una carta geológica a escala 1/500.000 actualizada, la que se publicó en versión digital en 1998. Quedó en falta la edición de un trabajo que compendiara la totalidad de los temas necesarios para el ingeniero agrónomo, hasta que en 2007 se cambia el equipo docente en su totalidad y aparecen estudiantes de agronomía que, a fines de 2009, entienden necesario publicar ese compendio.

Para nuestro grupo este trabajo y su publicación van a cambiar las posibilidades de orientar el aprendizaje al abrir un campo de esperanza, ya que los temas teóricos pueden ser aprendidos sin intervención docente y puede dedicarse más tiempo a tareas prácticas y resolución de problemas. Esa posibilidad va a poder formar más estudiantes con alto nivel, a pesar de la masificación actual (250 estudiantes para cuatro docentes).

De hecho, ya se consiguió que dos docentes, Alejandra Ortiz y Raquel Caggiano, quedaran a cargo de la elaboración de los borradores, exigiendo ponerse al día en los conocimientos y adaptarlos a las necesidades de un curso para Agronomía, lo cual asegura el comienzo de una nueva etapa de investigación a volcar a la enseñanza para respaldar un curso de nivel terciario.

Prof. Dr. Jorge Bossi

Introducción

Este *Manual de Geología para estudiantes de Agronomía* fue preparado en el Grupo Disciplinario de Geología del Departamento de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía, con el apoyo de la Comisión Sectorial de Enseñanza (CSE) de la Universidad de la República (Udelar), a partir de la idea original de Alejandra Ortiz, el trabajo ordenado y constante de Raquel Caggiano y la permanente supervisión de quien suscribe estas líneas.

En este ensayo se trataron de contemplar todos los aspectos que deben cubrirse en la enseñanza universitaria, de modo de construir una herramienta que permita satisfacer los principios que nuestro grupo de trabajo entiende como esenciales.

Lo primero que se atiende es la posibilidad de hacer predominar el aprendizaje sobre la enseñanza. Se brinda un documento estructurado y escrito de manera que fomente la lectura y minimice la necesidad de clases teóricas, sustituyéndolas por clases de consulta. A su vez, brinda la posibilidad de una enseñanza activa con fuerte participación del estudiante en el aprendizaje, ofreciéndole ejercicios y problemas resueltos, así como preguntas para que contesten por sus medios fomentando, principalmente, el trabajo en grupo.

Los temas elegidos son aspectos fundamentales de la geología aplicada a la agronomía, habiéndose dejado de lado toda información innecesaria.

Queda así un manual compacto y abierto a la profundización de conceptos por consulta a los docentes o a la bibliografía citada.

Jorge Bossi
Profesor de Geología
Departamento de Suelos y Aguas
Facultad de Agronomía

Agradecimientos

La posibilidad de concretar este trabajo fue el resultado de la confluencia de muchas voluntades que tuvieron la visión de detectar la necesidad de mejorar el conocimiento geológico básico en los estudiantes de agronomía como futuros profesionales. También apoyaron la idea de que el aprendizaje debe ser el pilar central de la enseñanza activa.

Fue la Comisión de Enseñanza de la Facultad de Agronomía quien brindó el primer gran respaldo, dándole prioridad institucional luego de un detallado análisis. El siguiente apoyo fue recibido de la Comisión Sectorial de Enseñanza de la Universidad de la República, que decidió financiar el proyecto.

Sin embargo, otras personas tuvieron gran incidencia en la posibilidad de publicar el manual: los comentaristas y revisores, profesor Julio González Antúnez y bachiller Noelia Muniz, quienes realizaron una tarea crítica muy constructiva.

Un lugar aparte merece reservarse para la licenciada Julia Leymonié, quien tuvo la difícil tarea de escribir el prefacio entendiendo exactamente nuestras aspiraciones y brindando, en pocas palabras, la filosofía que debe orientar la enseñanza universitaria actual y del futuro.

Documentos de base, cartografía y aerofotolectura

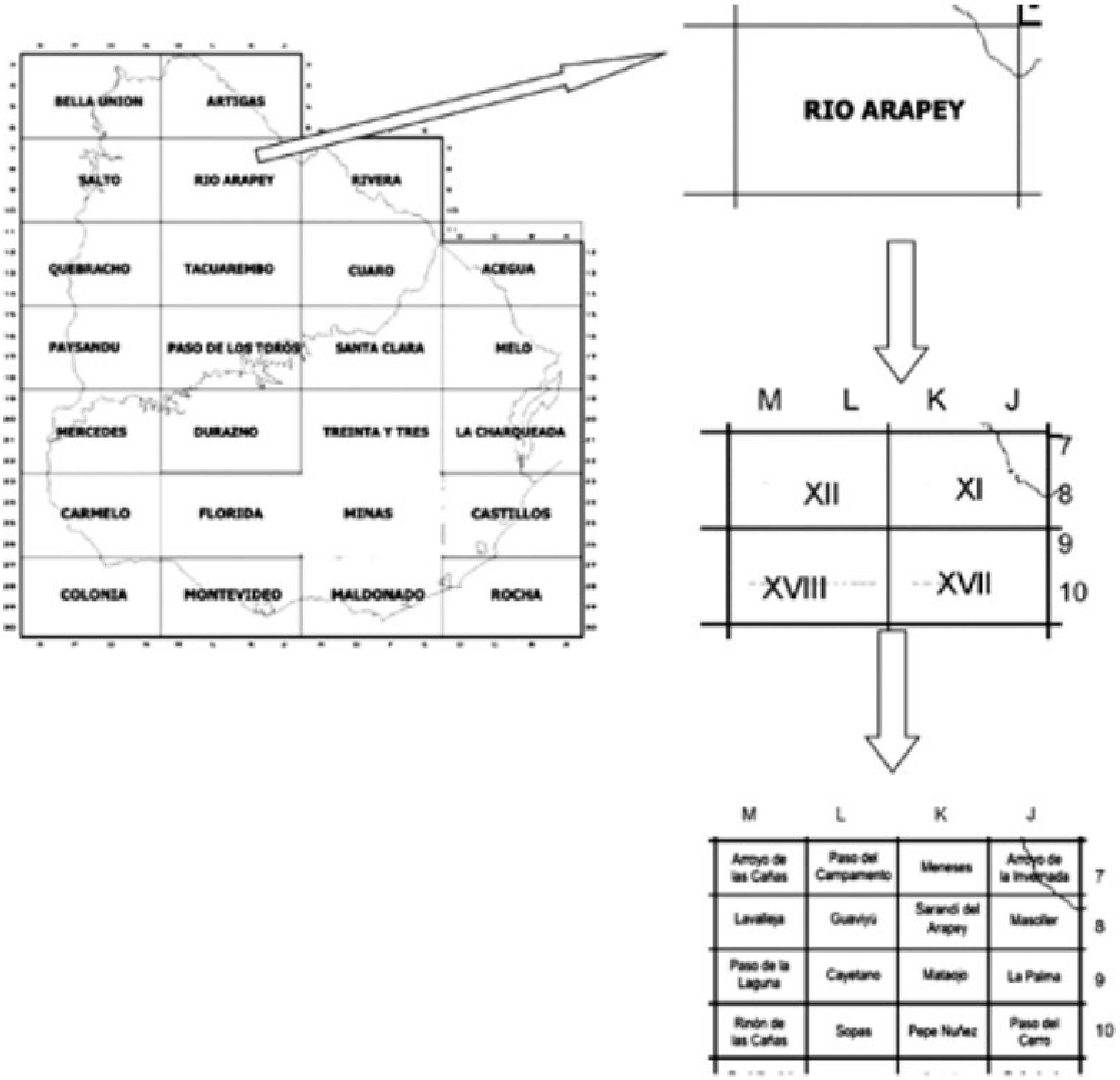
1.1. Documentos cartográficos

Uruguay presenta documentos cartográficos que cubren todo el país a varias escalas:

- 1/500.000, que contiene curvas de nivel cada 50 metros, los centros poblados, rutas, arroyos, ríos, límites departamentales, etc. Allí están indicadas las coordenadas planas cada 50 km, así como las centesimales y sexagesimales. Como es a escala 1/500.000 cada milímetro de la carta representa 500 metros de la realidad.
- 1/200.000, sin curvas de nivel, coincidiendo con los segmentos en que está dividido el territorio nacional.
- 1/100.000, sin curvas de nivel, abarcando un sector y señalados con números romanos crecientes hacia el sur y el oeste. Un milímetro de la carta representa 100 metros de la realidad.
- 1/50.000, con curvas de nivel cada diez metros y gran detalle de todos los elementos geográficos. Se denominan con un nombre, un número y una letra que también aumentan hacia el sur y el oeste. Cada kilómetro de la realidad tiene una longitud de dos centímetros en la carta. Presenta coordenadas planas cada dos kilómetros y coordenadas centesimales.
- 1/25.000, con curvas de nivel cada cinco metros, solo del departamento de Canelones.
- 1/10.000, con curvas de nivel cada dos metros, solo del departamento de Montevideo.

Cada segmento del Plan Cartográfico Nacional abarca cuatro sectores y cada sector abarca cuatro hojas topográficas a escala 1/50.000.

Uruguay está comprendido por 24 segmentos; cada segmento está constituido por cuatro sectores (92 en total) y cada sector por 16 hojas topográficas a escala 1/50.000, tal como se muestra en la figura 1.

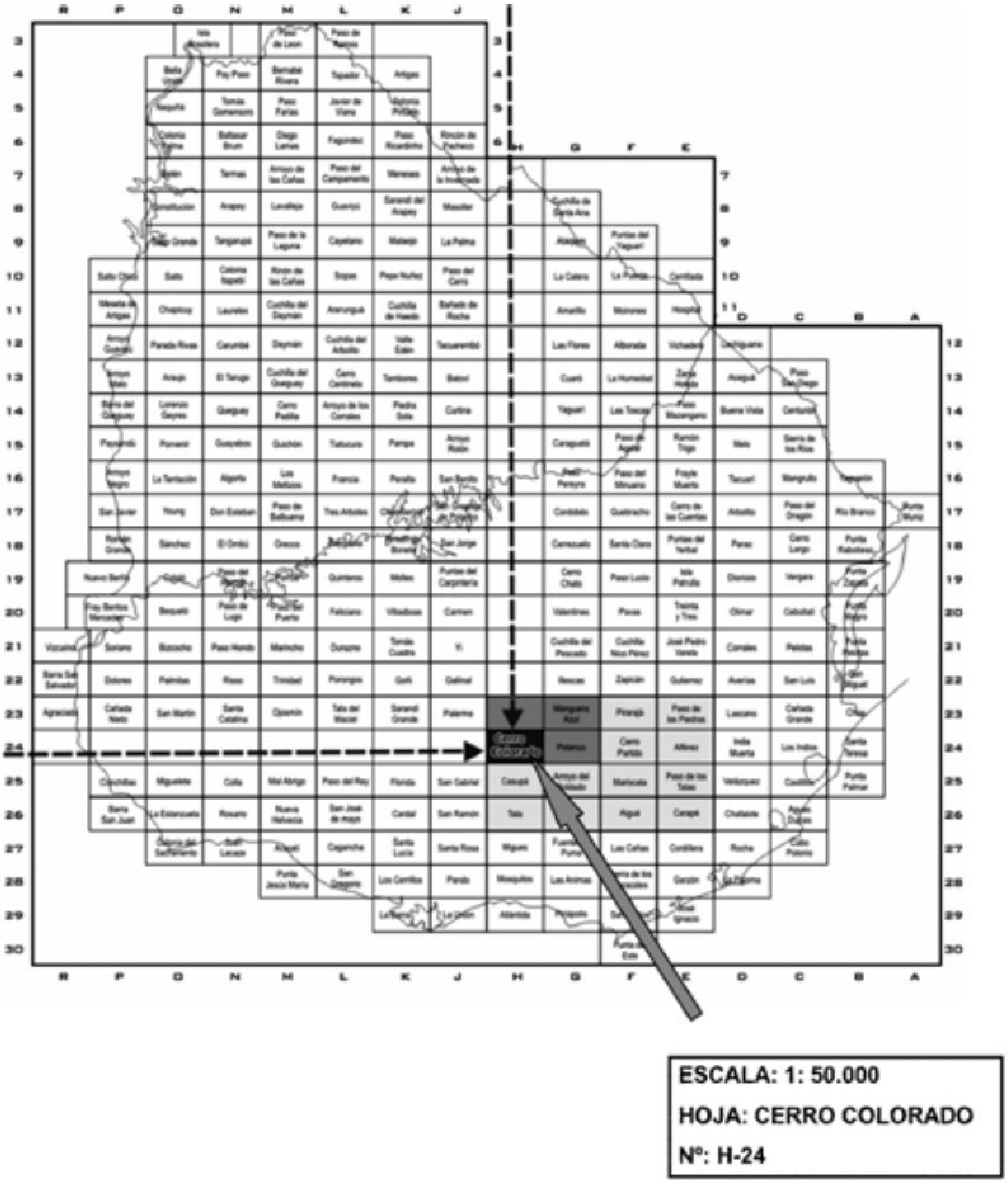

BELLA UNION
ARTIGAS
SALTO
RIO ARAPEY
RIVERA
QUEBRACHO
TACUAREMBO
CUARO
ACEGUA
PAYSANDU
PASO DE LOS TOROS
SANTA CLARA
MELO
MERCEDES
DURAZNO
TREINTA Y TRES
LA CHARQUEADA
CARMELO
FLORIDA
MINAS
CASTILLOS
COLONIA
MONTEVIDEO
MALDONADO
ROCHA
RIO ARAPEY
M
L
K
J
XII
XI
XVIII
XVII
7
8
9
10

M	L	K	J	
Arroyo de las Cañas	Paso del Campamento	Meneses	Arroyo de la Invernada	7
Lavalleja	Guaviyú	Sarandí del Arapey	Masoller	8
Paso de la Laguna	Cayetano	Mataojo	La Palma	9
Rinón de las Cañas	Sopas	Pepe Nuñez	Paso del Cerro	10

Figura 1. Distribución de segmentos, sectores y hojas topográficas del Plan Cartográfico Nacional

Ejemplo:
Segmento: Río Arapey.
Sectores: XI, XII, XVII, XVIII.
Hojas topográficas: 16 (desde M7 a J10).

En el siguiente mapa se muestran todas las hojas topográficas 1/50.000. Nótese que: en gris medio se indica el segmento, en gris más claro el sector y en gris oscuro la hoja topográfica.



ESCALA: 1: 50.000
HOJA: CERRO COLORADO
Nº: H-24

Figura 2. Ubicación de la totalidad de las hojas topográficas del Plan Cartográfico Nacional

1.2. Documentos fotográficos

Uruguay fue aerofotografiado en su totalidad en 1966-67, a escala 1/40.000 y 1/20.000. Las fotos a escala 1/40.000 tienen gran utilidad para estudios regionales, pues cada centímetro lineal de la foto abarca 400 metros de la realidad por lo tanto, cada cm² abarca dieciséis hectáreas. Como cada foto mide 22 cm de lado el área real abarcada por una foto 1/40.000 es de casi 8000 hás.

Las fotos 1/20.000 son más útiles para estudios de detalle porque un centímetro de la foto representa 200 metros de la realidad; en cambio, cubren alrededor de 1800 hás de la superficie real.

Tanto las fotos a escala 1/40.000 como las 1/20.000 son numeradas y colocadas en documentos que se denominan fotoíndices.

1.3. Sistemas de coordenadas

Para expresar la posición de cualquier punto sobre el globo terrestre se utiliza el sistema de coordenadas geográficas que caracteriza a cada punto por su latitud y longitud. La *latitud* es el ángulo que forma el plano ecuatorial con la recta que une el punto considerado con el centro de la Tierra. La *longitud* se define como el ángulo entre dos planos que se llaman planos meridianos: uno contiene al eje de la Tierra y el punto en cuestión, el otro contiene al eje de la Tierra y un punto arbitrariamente definido, localizado en el observatorio de Greenwich en Inglaterra.

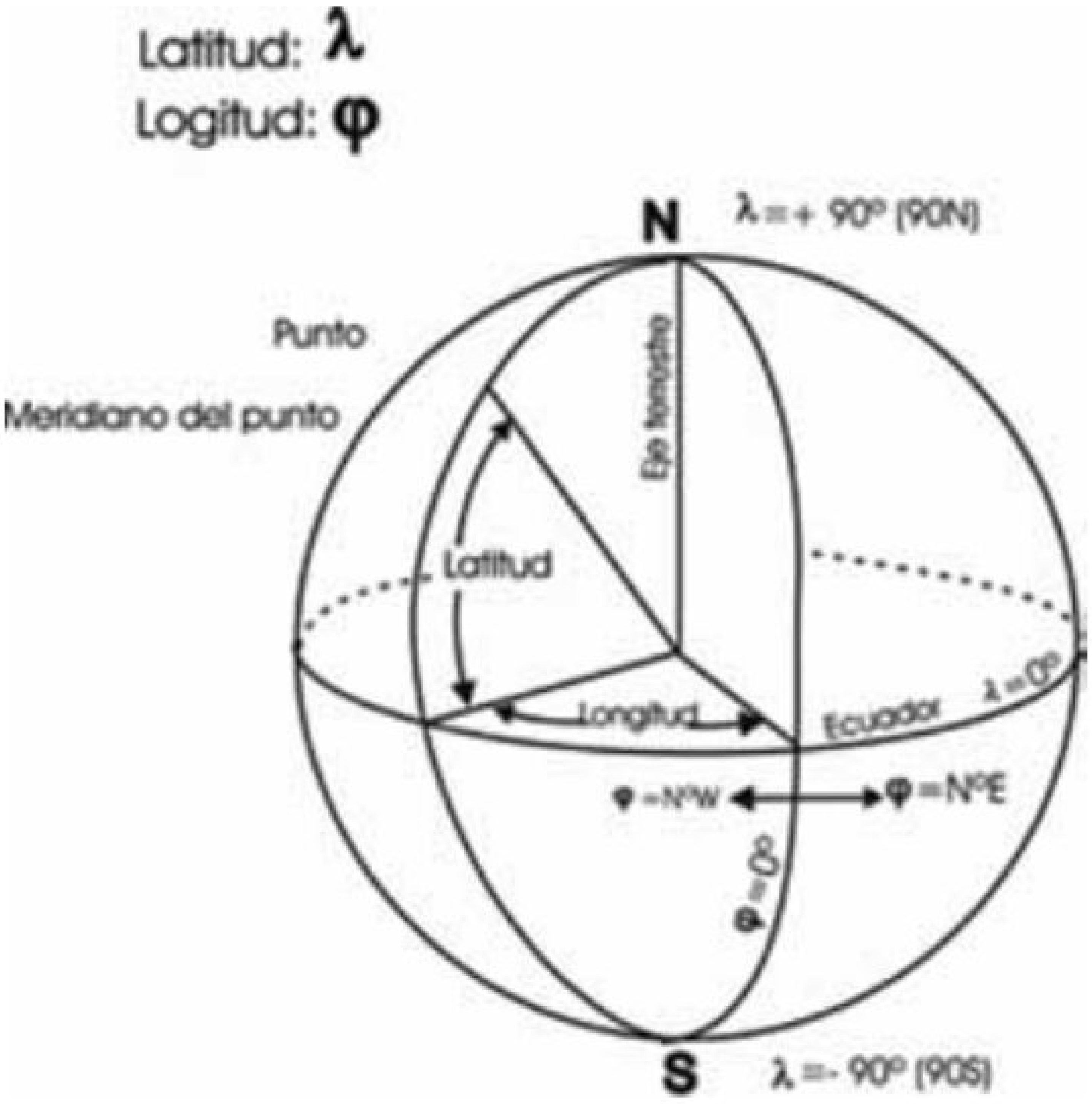


Figura 3. Latitud y longitud

La latitud se mide desde el ecuador (0°) hasta los polos (90°) adjudicando el signo N para el hemisferio norte y S para el sur. La longitud se mide desde el meridiano de Greenwich y toma valores comprendidos entre el 0° en el meridiano de referencia hasta 180°, agregándole los signos E o W a la semiesfera correspondiente.

Existen dos formas de uso común para expresar un valor angular: en grados sexagesimales o en grados centesimales. En la representación sexagesimal la circunferencia se divide en 360°, cada grado en 60 minutos y cada minuto en 60 segundos. Un ángulo se define utilizando la siguiente simbología: xx°xx'xx". La unidad es el grado sexagesimal.

En la representación centesimal, la circunferencia se divide en 400^{G}, cada grado en 100 minutos y cada minuto en 100 segundos. Un ángulo se define utilizando la siguiente simbología: xx^{c}xx'xx" o xx^{G}xx'xx".

El sistema de coordenadas geográfico resuelve el problema de ubicar un punto en la esfera terrestre. Un segundo inconveniente consiste en representar parte de esa esfera en el papel. Los métodos utilizados para llevar los puntos de la esfera al papel se denominan **sistemas de proyección**. Se utilizan diferentes sistemas de proyección según diversos factores, como la posición de la zona respecto al ecuador, el tamaño de la zona a representar, el objetivo de la carta, etc. En Uruguay se utiliza un sistema de proyección denominado Proyección Universal Transversal o *Gauss-Krugger*. El meridiano de contacto del **cilindro de proyección** con el terreno es el $62^{G}00'$ w, que pasa entre Salinas y Atlántida en el departamento de Canelones. Ese valor se corresponde con el meridiano de 55°48'00" y con la Cpx de 500 km.

Además, se debe tener en cuenta el tipo de proyección utilizada en los mapas terrestres: el *datum*. El datum de una carta geográfica es un conjunto de parámetros que cuantifican la desviación que tienen los datos de longitud y latitud respecto a un datum tomado como patrón.

El datum patrón utilizado en latinoamérica es el WGS84 (*World Geodetic Sistem*, 1984). Los valores de latitud y longitud que se leen en un GPS están referenciados a este datum. Sin embargo, el datum utilizado en Uruguay es el Yacaré que difiere ligeramente con el WGS84.

1.3.1. Conversión de grados sexagesimales a centesimales

Por ejemplo, tomemos la longitud del meridiano de contacto de la proyección *Gauss-Krugger* en Uruguay: 55°48'00".

Calculemos este valor en grados (como fracción): 48 minutos equivalen a 0,8°, por lo que podemos anotar esa longitud como 55,8° sexagesimales.

1° sexagesimal equivale a $1{,}11111^{G}$ centesimales, por lo que 55,8° serán 62.0000^{G} o bien $62^{G}00'00''$.

1.3.2. Conversión de grados centesimales a sexagesimales

Tomemos una longitud en grados centesimales: $61^{G}68'$. Este valor puede ser anotado como $61{,}68^{G}$.

1^{G} equivale a 0,9°, por lo que $61{,}68^{G}$ serán 55.512° sexagesimales.

Se convierte ahora el valor decimal a minutos (multiplicando por 60): 55°30,72'.

Convertimos el valor decimal de los minutos a segundos (multiplicando por 60): 55°30'43".

Entonces: $61^{G}68'$= 55°30'43".

1.3.3. Coordenadas planas

A efectos de facilitar el manejo de las cartas se ha diseñado sobre las mismas una retícula plana constituida por líneas rectas que forman ángulos de 90° entre sí, que en las cartas 1/50.000 se representan equiespaciadas a dos kilómetros. Estas líneas no son ni meridianos ni paralelos.

Este sistema es ventajoso pues resulta muy sencillo de utilizar. Por simple interpolación se pueden calcular las coordenadas planas en retícula plana de cualquier punto del territorio nacional. El significado que tienen estas líneas es el siguiente: la coordenada X representa la distancia medida en kilómetros desde una línea paralela al meridiano de contacto y ubicada 500 km hacia el oeste del mismo (en la República Argentina). La coordenada Y representa la distancia al Polo sur del punto considerado (expresada en kilómetros). Ello nos ayuda a comprender por qué estas coordenadas crecen hacia el este y hacia el norte respectivamente. En cambio, las sexagesimales y centesimales crecen de este a oeste y de norte a sur.

Teniendo las coordenadas de dos puntos cualesquiera, la distancia más corta entre ellos puede ser calculada utilizando el teorema de Pitágoras: la distancia del punto A (de coordenadas XA e YA) respecto del B (con coordenadas XB e YB) será igual a la raíz cuadrada de la suma de sus cuadrados:

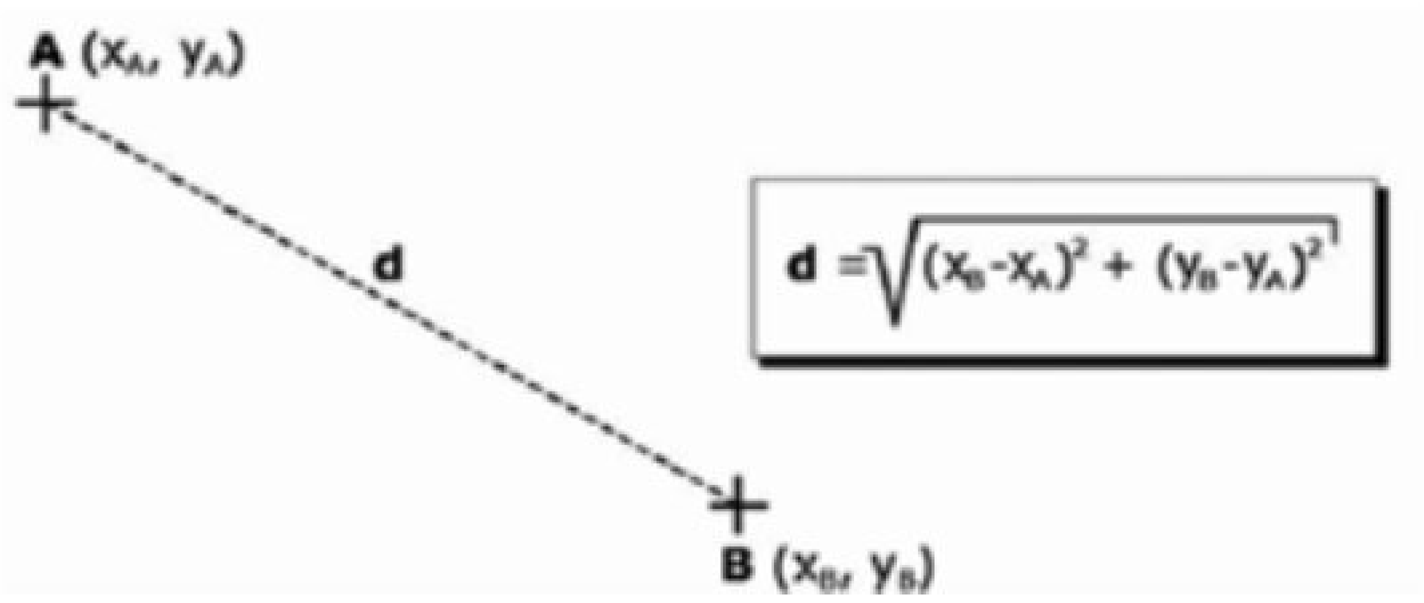


Figura 4. Distancia entre dos puntos aplicando Pitágoras

Las coordenadas planas son útiles también para calcular áreas de polígonos regulares. Para ello se aplica la fórmula de Herón, la cual establece que:

$A = \sqrt{p}\,(p - a)\,(p - b)\,(p - c)$

Siendo p el hemiperímetro, el cual se calcula como: $p = \underline{a+b+c}$

2

a, b y c son las distancias entre puntos, las cuales se calculan aplicando el teorema de Pitágoras como se señaló anteriormente.

1.4. Cartografía

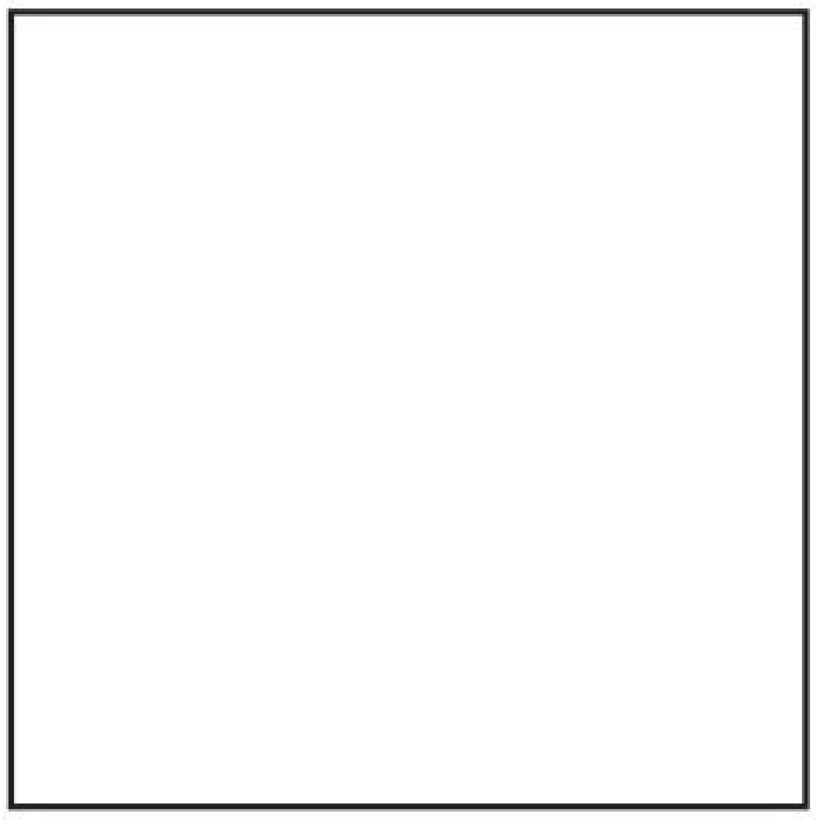
La cartografía es la representación gráfica de un parámetro de interés —en las áreas que presenta valor similar— referido en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Los mapas y cartas deben representar fielmente las características de una zona, respetando sus proporciones y su forma. Los diferentes objetos cartográficos, según su dimensión real, deberán ser reducidos para ser representados de una forma directamente observable en conjunto, según el interés perseguido en cada caso.

La magnitud de la reducción depende del tamaño original del objeto a ser representado. Cuando se hace esta reducción se dice que el objeto está hecho **a escala**.

La escala es la relación lineal entre la dimensión de la representación gráfica y el objeto representado. En las cartas siempre es un cociente con el denominador indicando las veces que fue reducido el tamaño del objeto. También el dibujo puede ser mayor que el objeto y, por lo tanto, la escala es de 1x.

Citemos como ejemplo para calcular la escala un potrero cuadrado de 10 hás de superficie, tal como muestra la figura:



Lo primero que debemos calcular es el lado de ese potrero. Para ello partimos de la superficie que ocupa. Recordemos que el área de un cuadrado se calcula como:

$A= l^2$. Si el área que ocupa es 10 há, entonces el lado será:

$l= \sqrt{A} = \sqrt{10}$ hás= 3,16 hm = 316 m.

Entonces, el lado de ese potrero será de 316 metros. Supongamos ahora que el lado del potrero en el dibujo es de 4,5 cm aproximadamente.

Para calcular la escala procedemos de la siguiente manera:

316 m --------- 4,5 cm
x --------------- 1 cm x= 70,22 m

Por lo tanto, la escala a la que está representado en el papel ese potrero es 1/7.000 aproximadamente (1 cm en el papel equivale a 70 m en la realidad).

1.4.1. Cartas topográficas

Son documentos que deben representar las características de una zona respetando proporciones y formas. Los objetos deben ser reducidos para ser observados directamente en su conjunto. Contienen curvas de nivel.

Las *curvas de nivel* son líneas donde todos los puntos de la superficie están a la misma altura. Cuando esas alturas se refieren al cero oficial del puerto de Montevideo, es la cota. En estas cartas topográficas están indicadas en metros. En las siguientes figuras vemos las curvas de nivel en dos escalas: 1/500.000 y 1/50.000.

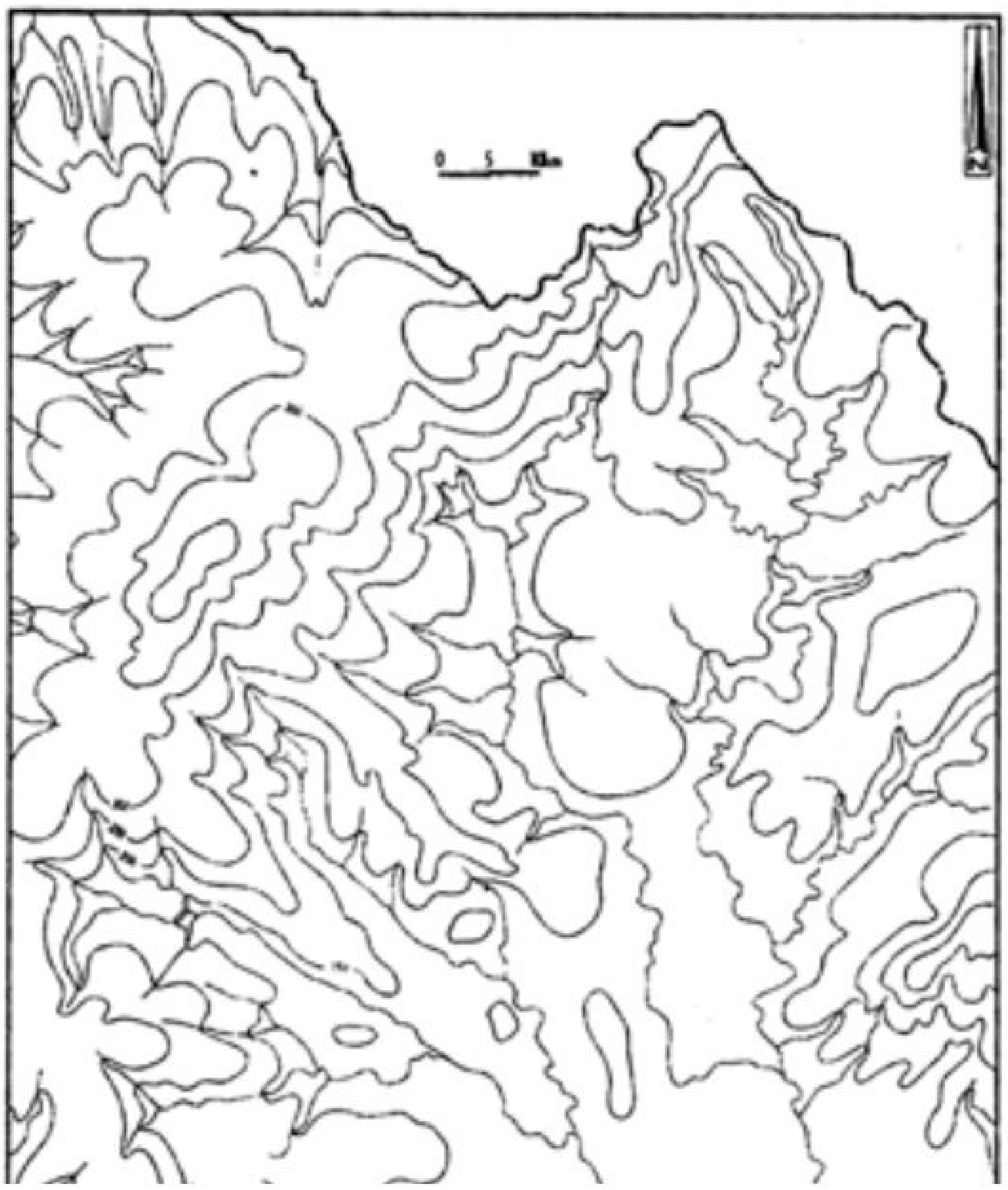


Figura 5. Curvas de nivel a escala 1/500.000, cada 50 m de altura

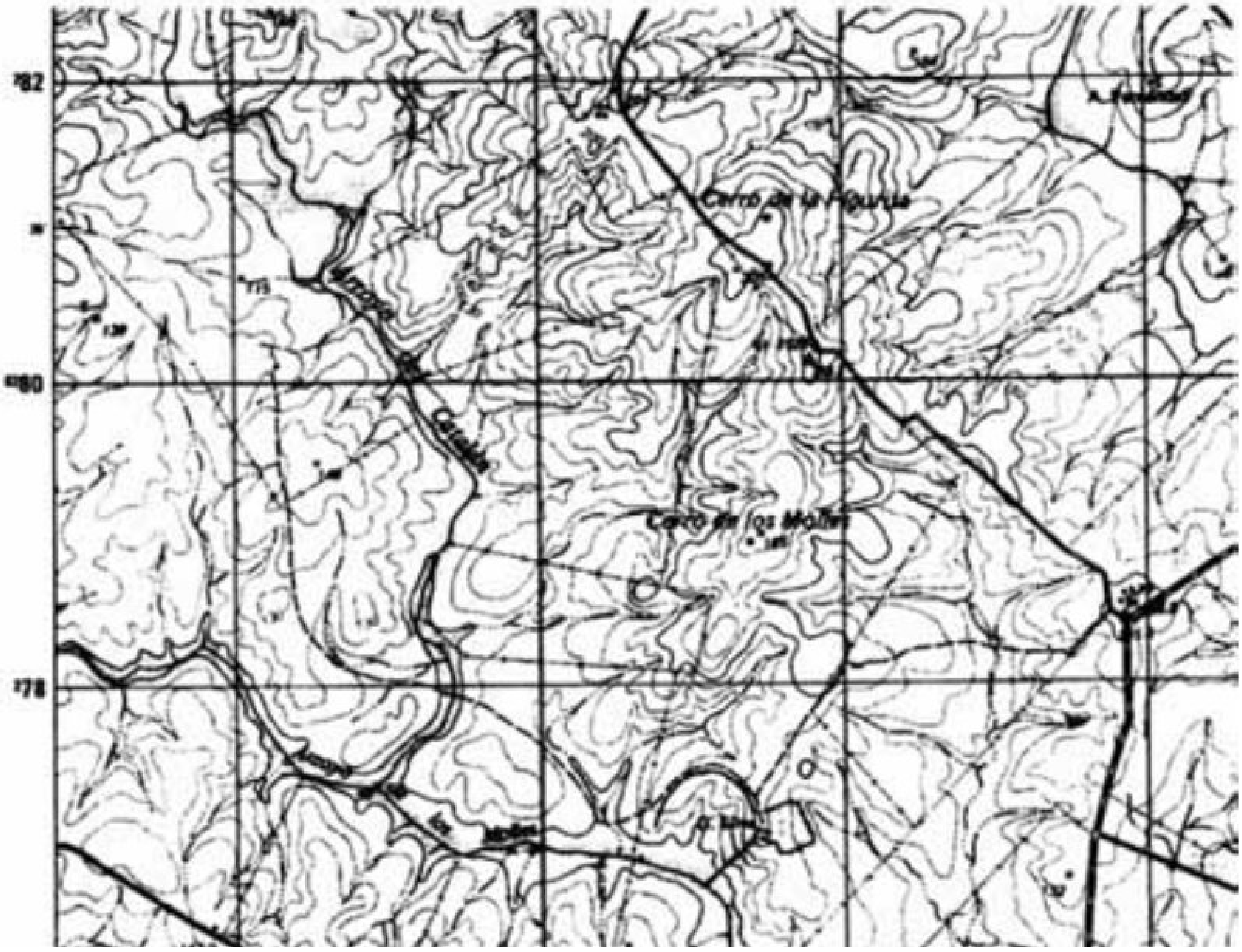

82
80
78
Cerro de los Molles

Figura 6. Curvas de nivel cada 10 m de altura

1.4.2. Cortes topográficos

Las curvas de nivel son de suma utilidad para realizar *cortes topográficos*. A continuación se expone una secuencia de pasos para obtenerlos. Aquí tenemos una carta a escala 1/10.000 con sus curvas de nivel:

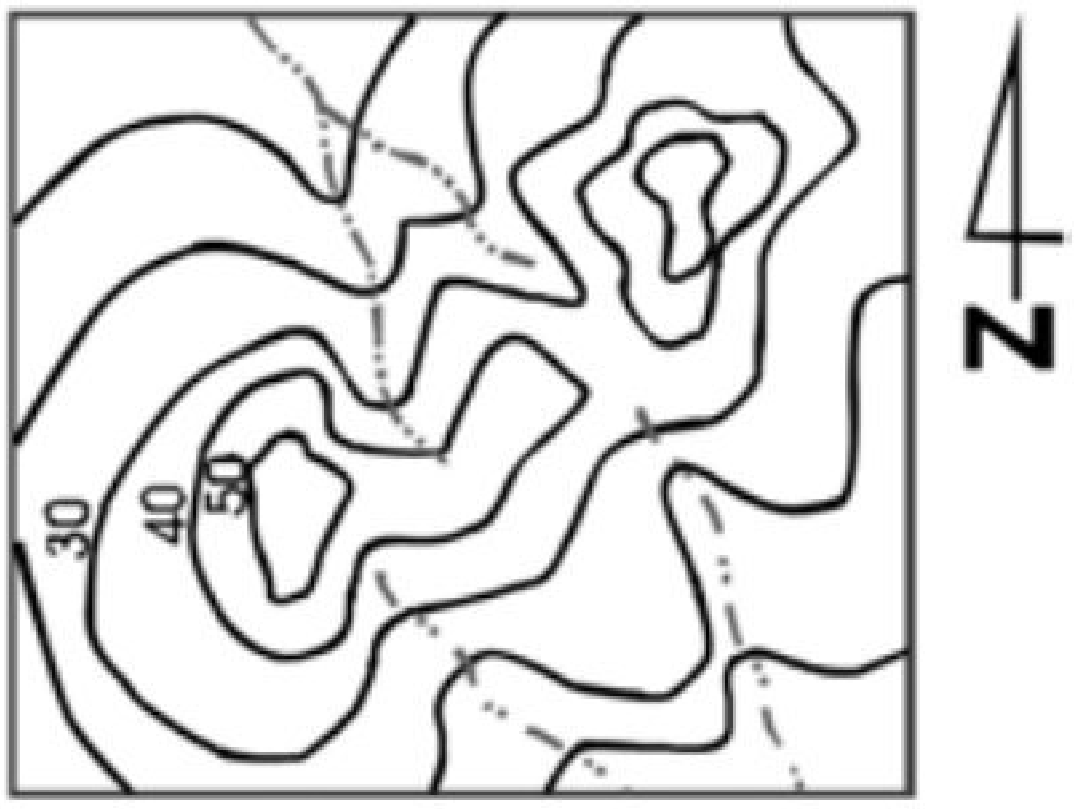


Figura 7. Corte topográfico. Escala 1/10.000

A continuación indicamos la zona en donde queremos realizar el corte:

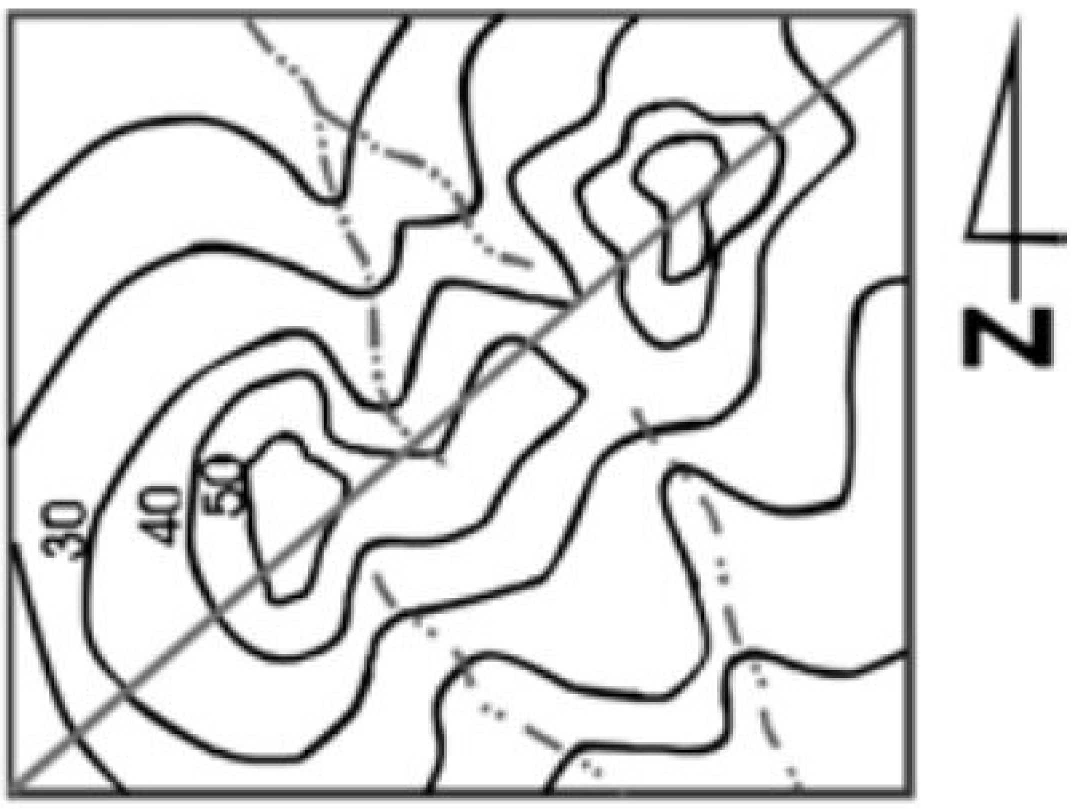


Figura 8. Corte topográfico. Escala 1/10.000

Colocamos luego un papel cuadriculado sobre el corte deseado:

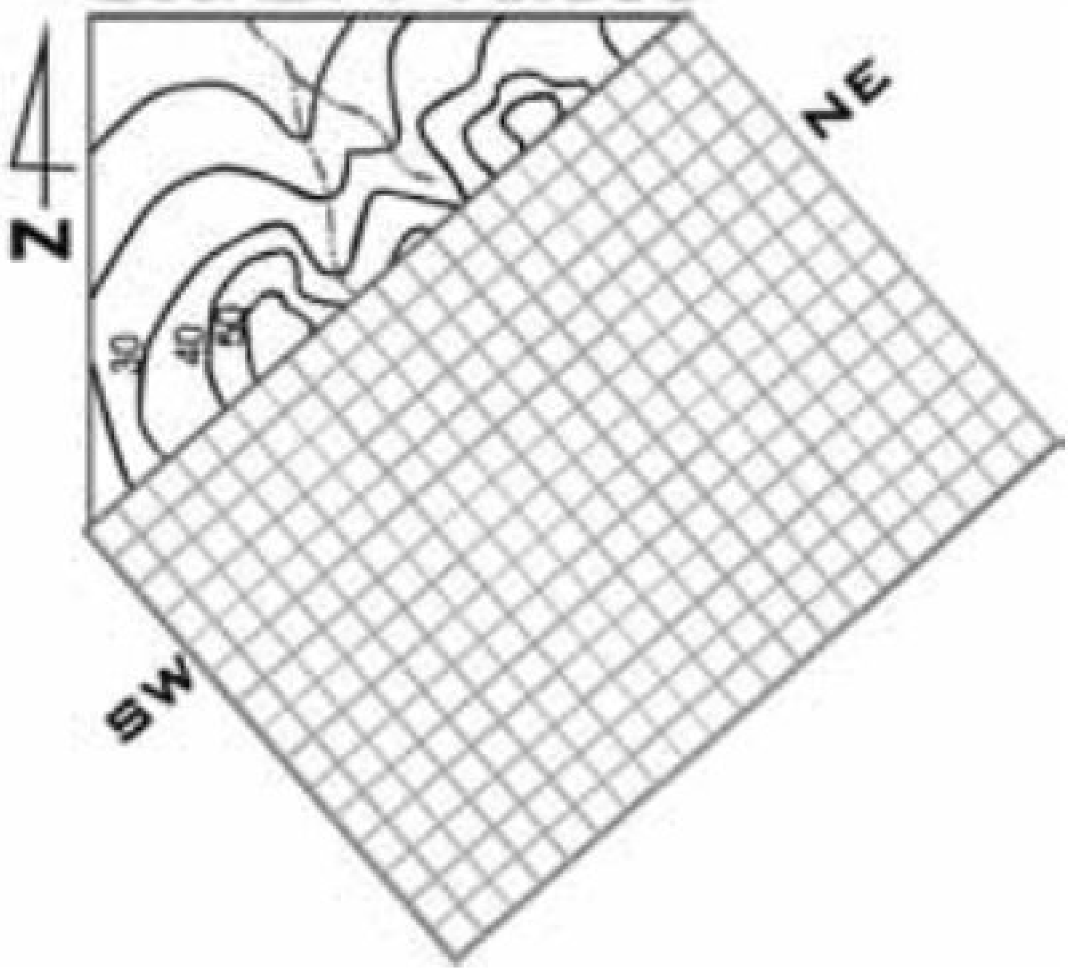

N
NE
SW
30
40
50

Figura 9. Corte topográfico. Escala 1/10.000

Bajamos los puntos.

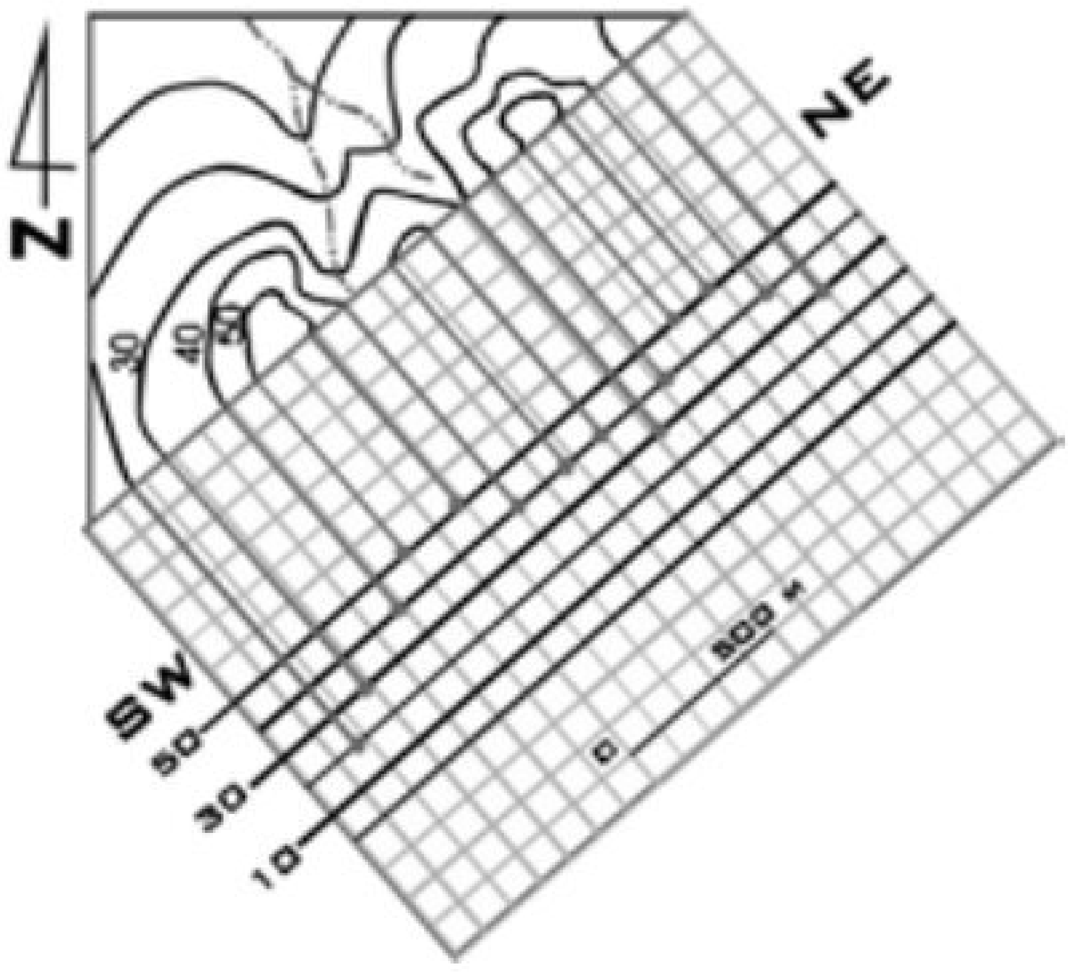

N
NE
SW
30
40
50
50
30
10
500 M
0

Figura 10. Corte topográfico. Escala 1/10.000

Unimos los puntos, obteniendo así el corte topográfico:

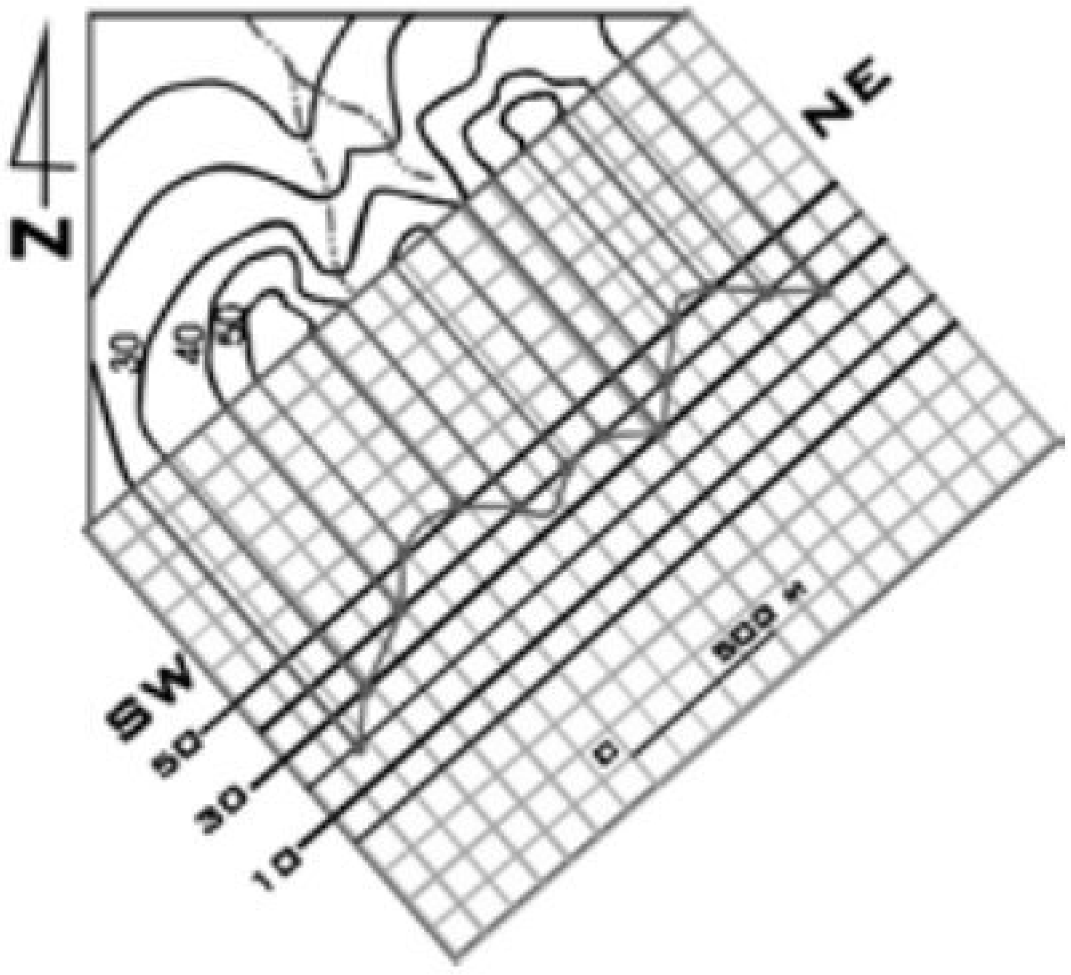

N
NE
SW
30
40
50
50
30
10
500 M
0

Figura 11. Corte topográfico. Escala 1/10.000

Luego podemos calcular pendientes:

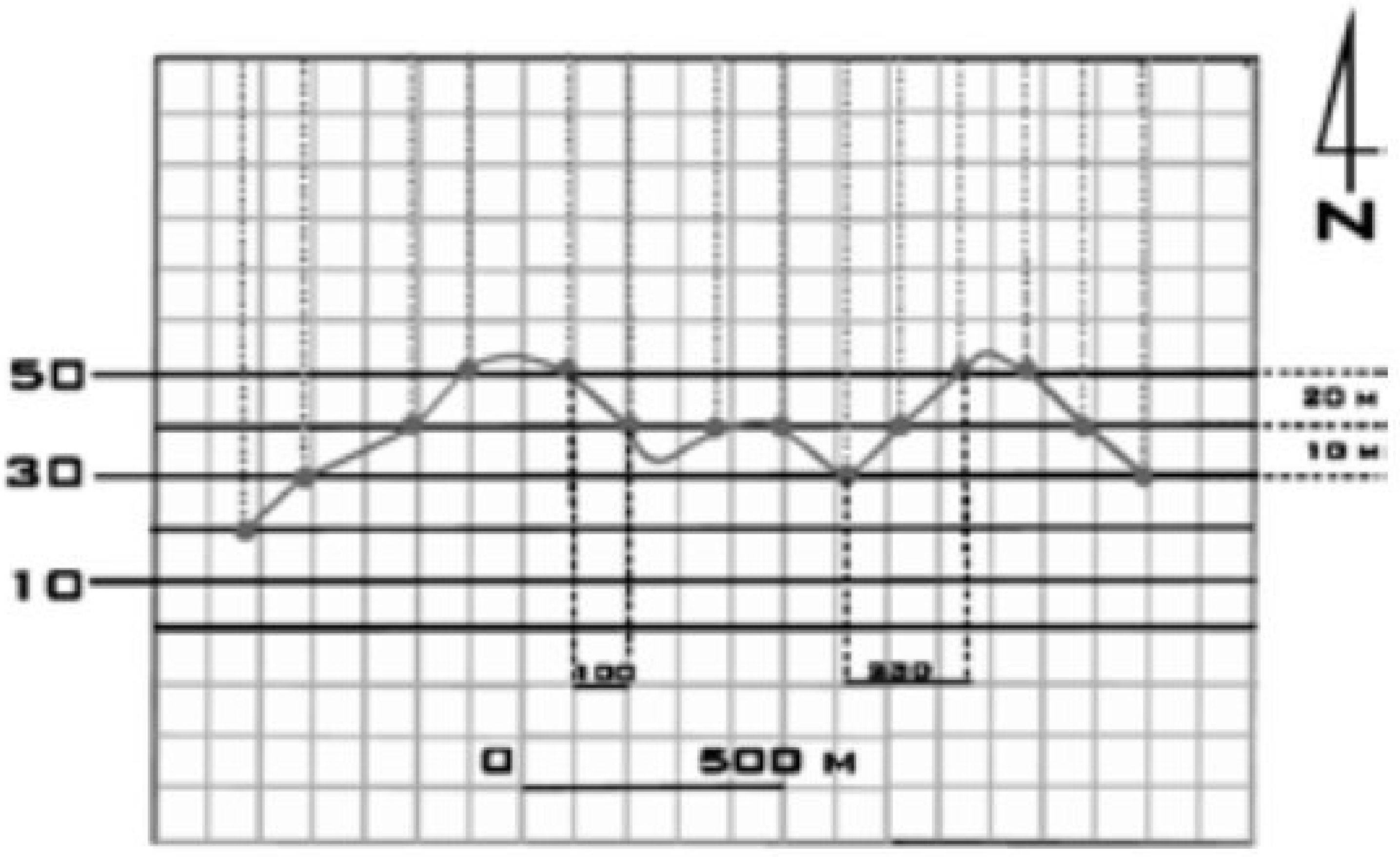


Figura 12. Corte topográfico

1. Pendiente al sw = desnivel / longitud = 10 m x 100 /100 m =10%.
   Pendiente angular = cateto opuesto / adyacente= 10m/ 100m=tg $\alpha = 0{,}1$
   $\alpha = \text{arctg } 0{,}1 = 5^{\circ}\ 42'\ 38''$.
2. Pendiente al NE = 20m x 100 /230m = 8,69%.
   Pendiente angular: tgα = 20m /230m = 0,086 de donde α =
   arctg 0,086=$4^{\circ}\ 58'\ 11''$.

1.4.3. Cálculo de distancia y rumbo

Estos se pueden realizar de dos maneras:

a. A partir de coordenadas planas usando Pitágoras:

$d = a^2 + b^2$

a = YA – YB = 1200 m

b = XB – XA = 3400 m

d = 3605 m

tg α = b/a = 3400/1200 = 2,83

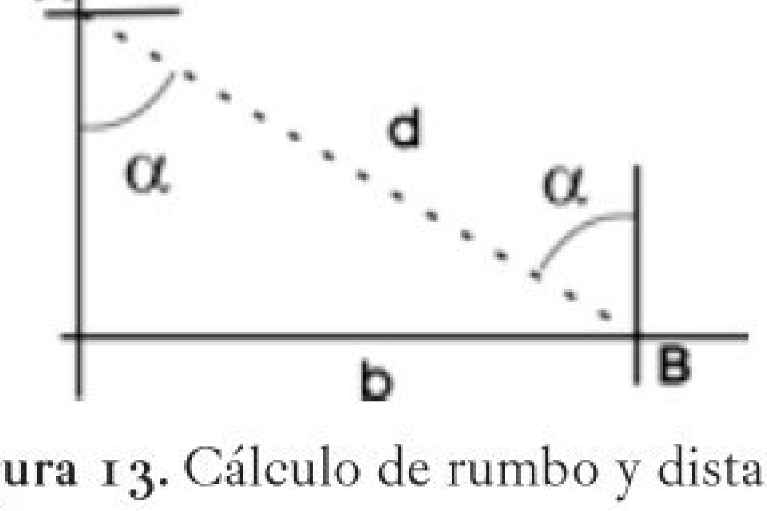


Figura 13. Cálculo de rumbo y distancia

arctg 2,83= 70°

RUMBO = N 70 W $\alpha = 70^{\circ}$

b. Midiendo en la carta a escala conocida:

AB = 2,8 cm

Escala 1/50,000

d= 1400 m

Rumbo con semicírculo

N30W

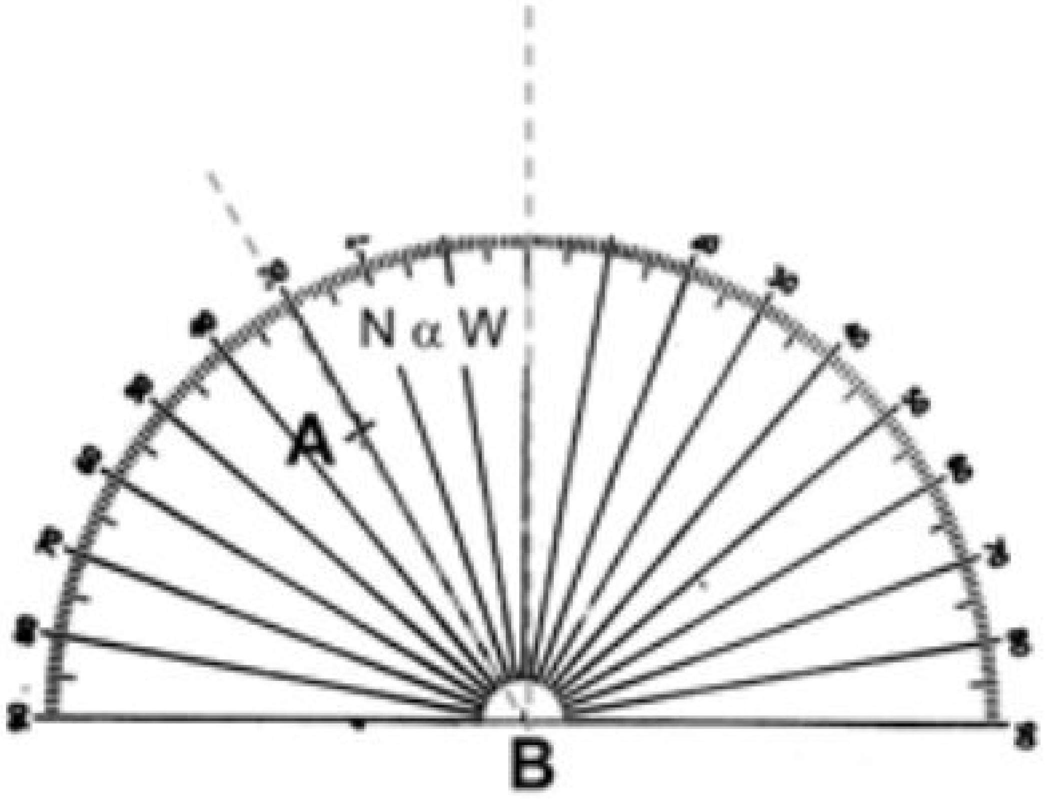


Figura 14. Otra técnica para determinar rumbo

1.4.4. Cálculo de áreas

Al igual que el rumbo, las áreas se pueden calcular de varias maneras:

a. Por retícula transparente: las áreas deben tener del orden de los 100 puntos para que sea preciso. Para ello se pueden usar retículas con diferente separación. Aquí se muestran retículas cada 5 y 2,5 mm. Puede usarse también retícula cada milímetro si el área a medir es pequeña.

5 mm 2,5 mm

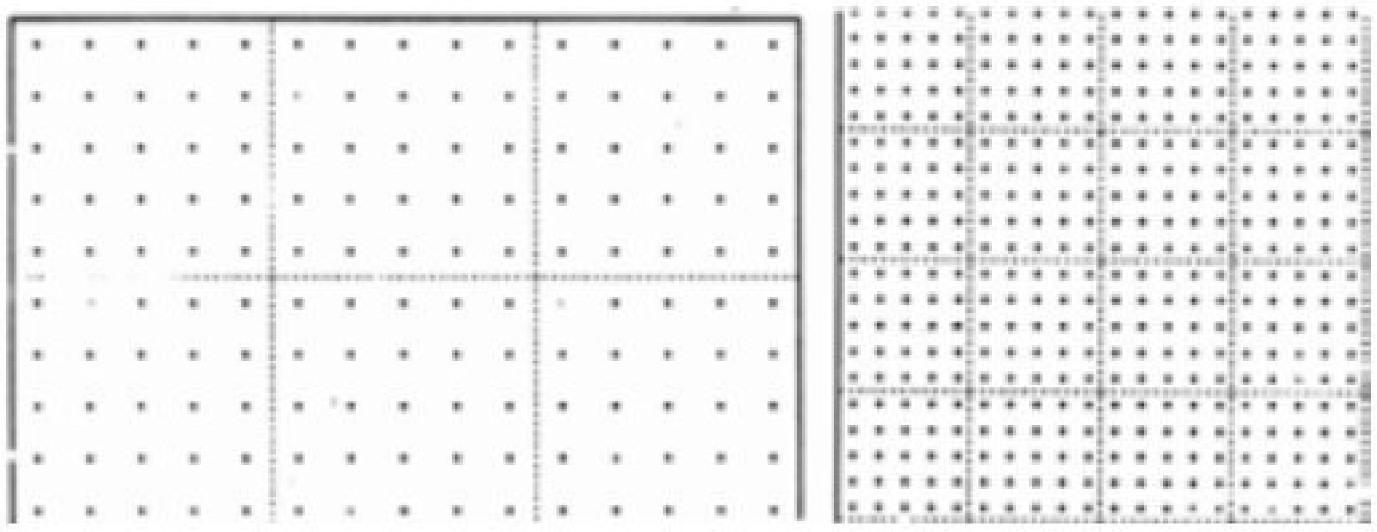


Figura 15. Retículas transparentes de diferentes tamaños

b. Con papel cuadriculado:

Unidades enteras + 0,5 x unidades seccionadas = unidades de cuadrículas equivalentes

56 + 41 /2 = 76,5
Escala 1/10.000
5mm = 50 m
1 cuadrado = 2500m2
76,5 cuadrados =
2500 x 76,5 = 191.250 m^2=19,1 hás

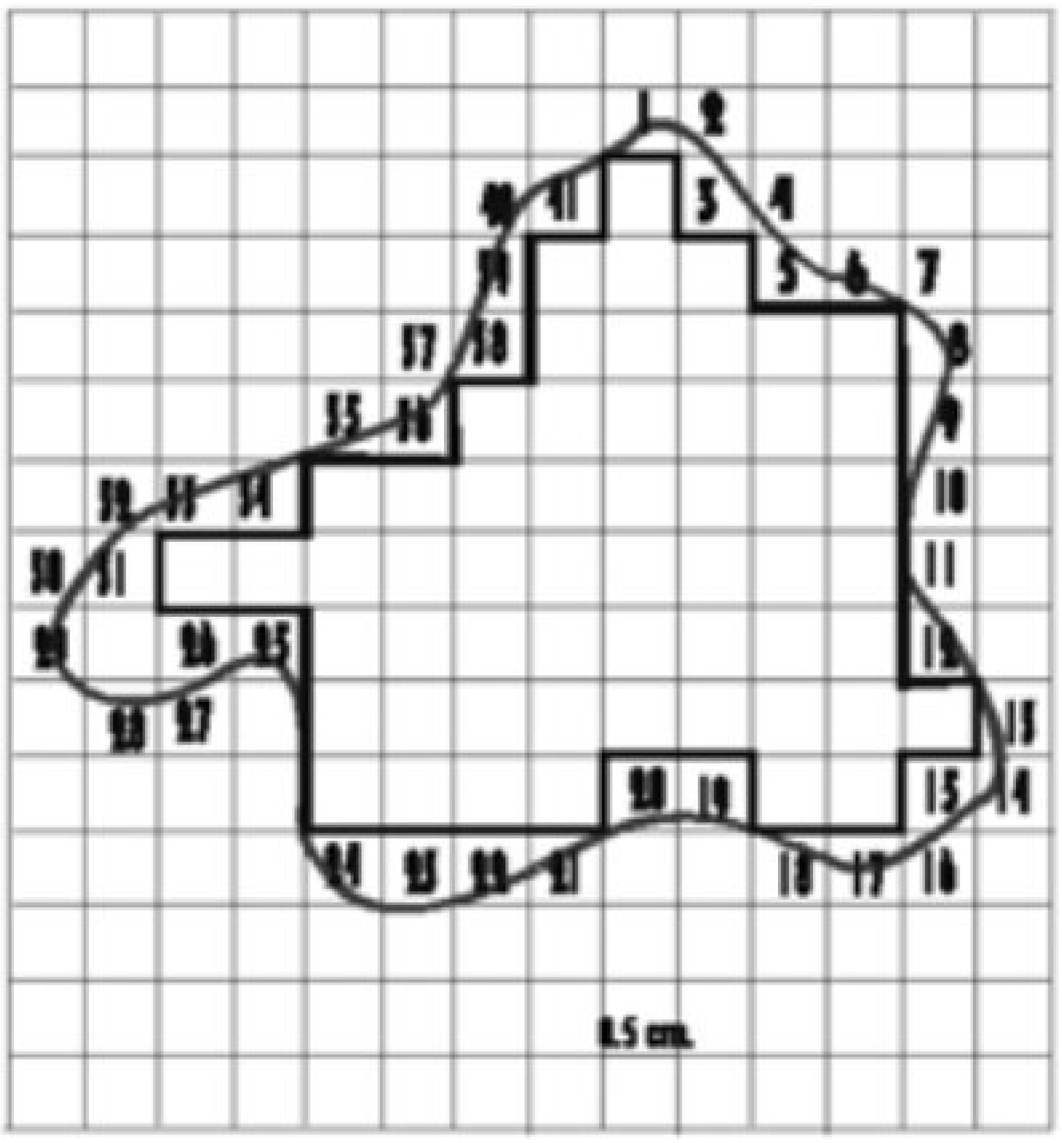


Figura 16. Ejemplo de cálculo de área con papel cuadriculado

1.5. Aerofotolectura

Un documento de base cada vez más importante es la fotografía aérea y las imágenes satelitales, especialmente valiosas para la regionalización espacial de cualquier recurso natural, trazado de carreteras, tendido de líneas de alta tensión, etc.

Uruguay dispone de fotos aéreas a escala 1/20.000 y 1/40.000 de todo el territorio nacional tomadas en 1966-67, de algunas zonas a diferentes escalas en 1984, de pequeñas zonas forestales del país a escala 1/5.000 y 1/10.000 desde 1995 y buena parte del territorio con alta resolución en el programa Google Earth.

Se trabajará con cuatro tipos de documentos: fotos aéreas a 1/20.000 y 1/40.000 de 1966-67; fotos aéreas 1/10.000 en color de 2006 y material de *Google Earth*.

1.5.1. Obtención de la foto aérea

Las fotos aéreas se obtienen en cámaras de diseño especial, con negativo de gran tamaño (24 x 24 cm) utilizando película de alta sensibilidad y grano fino. La cámara va montada en un dispositivo (suspensión cardán o universal) que permite que el plano de la película se encuentre siempre en posición horizontal.

Para las fotografías que se toman actualmente, y las disponibles en Uruguay, el avión realiza vuelos en dirección NS (ida) y SN (vuelta). Durante esos vuelos la cámara es disparada de manera tal que cada fotografía se solapa con la tomada anteriormente en 60%. Entre bandas sucesivas el solape es del 20%.

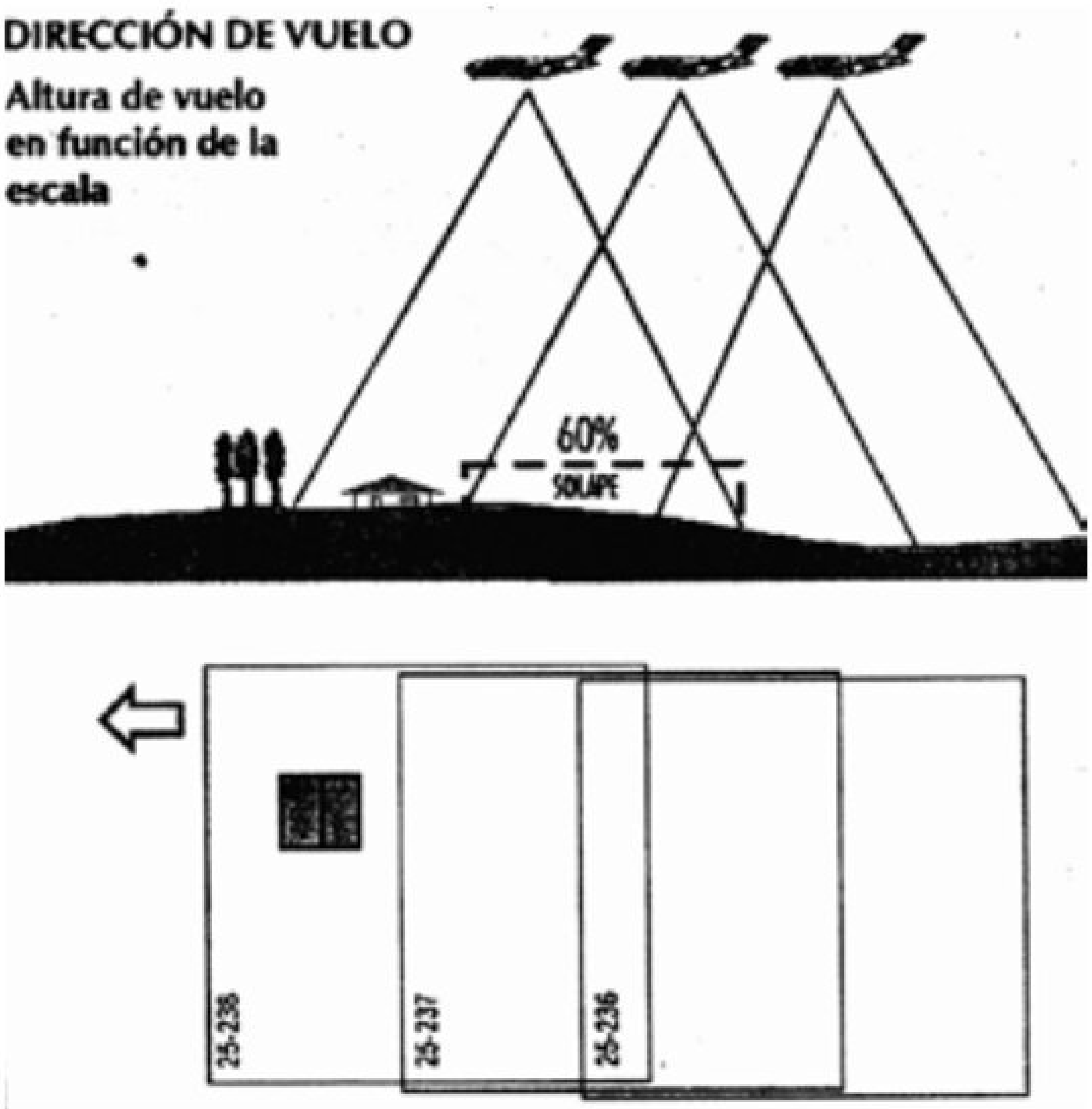

DIRECCIÓN DE VUELO
Altura de vuelo en función de la escala
60%
SOLAPE
25-238
25-237
25-236

Figura 17. Dirección del vuelo mostrando el solapamiento de las fotos consecutivas

De esta manera se obtienen, de cada punto del terreno, por lo menos dos fotografías tomadas en posiciones sucesivas de la cámara durante el vuelo. Esta técnica permite la visión estereoscópica de la superficie fotografiada utilizando un par de fotografías sucesivas a las que denominaremos par estereoscópico.

A efectos de localizar la foto aérea en un lugar determinado existe una serie de documentos llamados *fotoíndices* cuya cobertura coincide con una hoja del Plan Cartográfico Nacional en el caso de las fotos 1/20.000 y con un sector en las 1/40.000. Estos documentos se obtienen a escala 1/100.000 y muestran cada foto en su posición real.

1.5.2. Información contenida en cada foto

Cada fotografía aérea está unívocamente identificada por un número que se halla ubicado en uno de sus vértices escrito con caracteres en blanco. Este número tiene dos cifras, habitualmente separadas por un guión, de las cuales la primera indica la banda y la segunda la posición de la fotografía en esa banda.

La distancia focal es un elemento que caracteriza la cámara con que fue obtenida la foto. Las marcas fiduciales permiten reconstruir con precisión el centro de la fotografía.

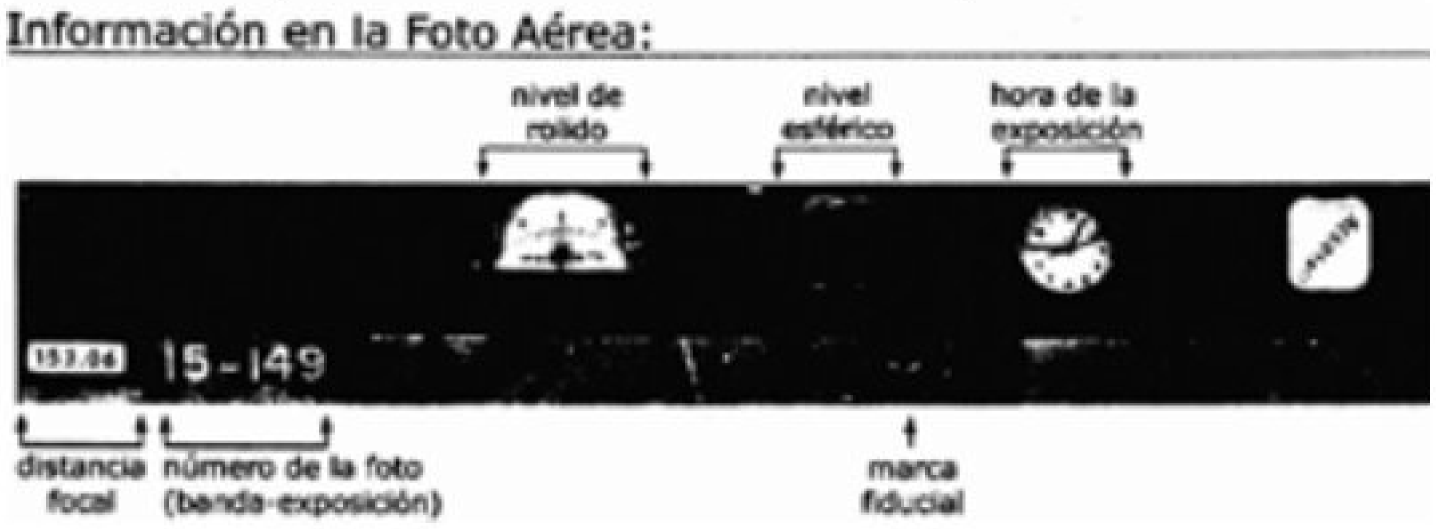

Información en la Foto Aérea:
nivel de rolido
nivel esférico
hora de la exposición
153.06
15-149
distancia focal
número de la foto (banda-exposición)
marca fiducial

Figura 18. Información de la foto aérea

1.5.3. Relaciones geométricas en la foto aérea

Las tres variables en juego que determinan el área abarcada por cada fotografía, así como la escala de la misma, son: la altura de vuelo, la distancia focal y el tamaño del negativo.

La relación matemática que liga estas tres variables, así como un esquema que auxilia a su comprensión, se encuentran en la figura adjunta.

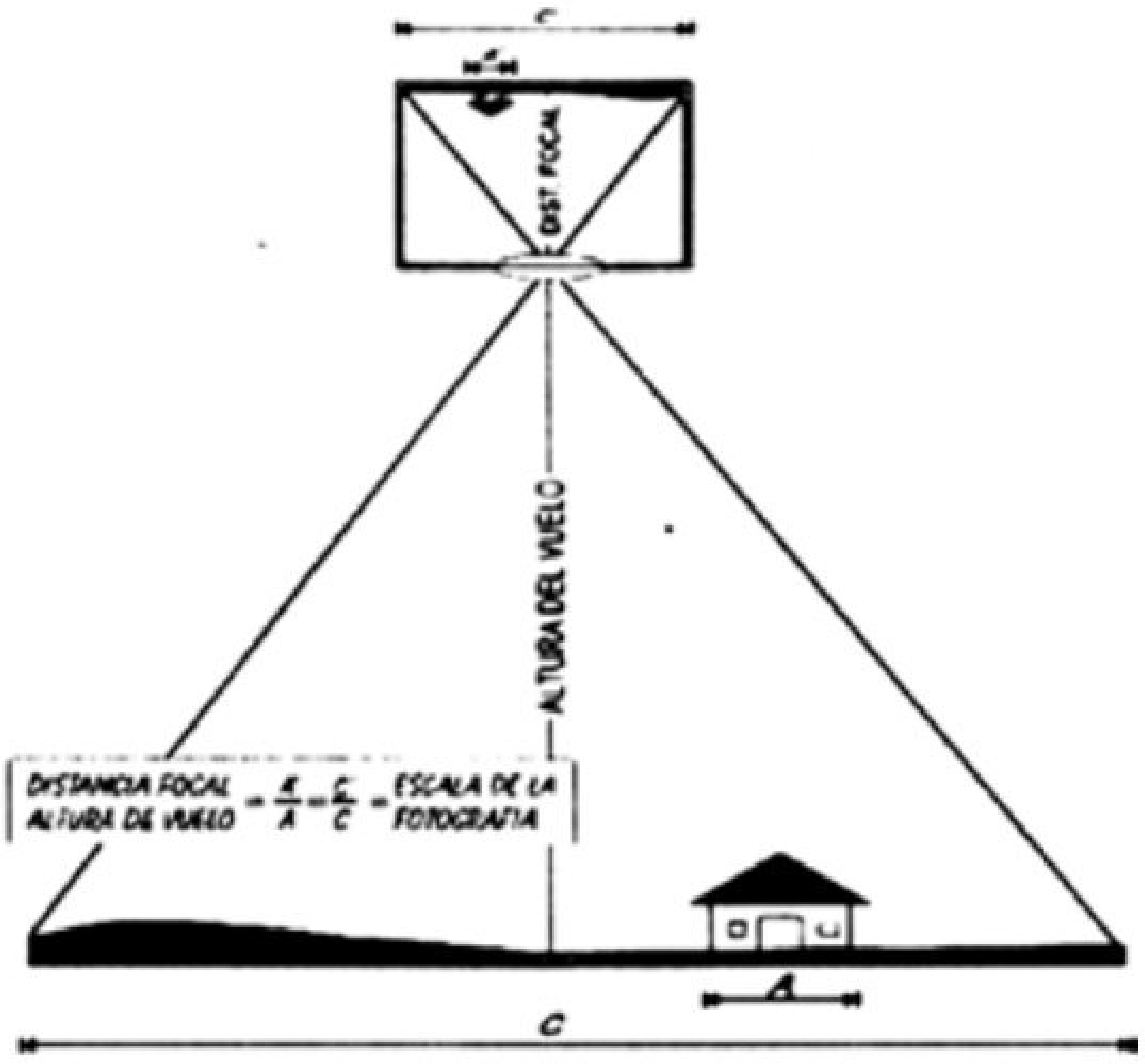

c
a
DIST. FOCAL
ALTURA DEL VUELO
DISTANCIA FOCAL / ALTURA DE VUELO = a/A = c/C = ESCALA DE LA FOTOGRAFIA
A
C

Figura 19. Relaciones geométricas en la foto aérea

1.5.4. Fotogrametría

1.5.4.1. Medida de longitudes en foto aérea

Una vez identificados algunos elementos de la foto aérea, como el trazado de la caminería, los límites entre propiedades o la red de drenaje, se puede proponer averiguar la longitud real de cualquiera de estos elementos.

Si los elementos son rectilíneos o poligonales bastará con medir individualmente cada uno de los segmentos que forman el trayecto y, aplicando la relación de escala, obtener la longitud total buscada.

Si los elementos son curvos, como el recorrido de un curso de agua meandroso, puede utilizarse un hilo delgado que se irá superponiendo sobre el trayecto con el debido cuidado, para luego extenderlo y medir así la longitud total buscada.

1.5.4.2. Medida de áreas

Resulta de suma utilidad poder medir el área de superficies que cumplan con una determinada condición, por ejemplo: se podría plantear medir el área de montes artificiales en una región o la comprendida dentro de un determinado límite catastral. El proceso que se utilice para medir un área dependerá de la forma del polígono a medir. Con límites rectilíneos se puede triangular; con límites irregulares tiene que medirse con la retícula apropiada.

1.5.4.3. Significado de algunos términos utilizados

Montes nativos: son aquellos desarrollados espontáneamente sin la intervención del hombre y están compuestos por especies autóctonas. Se clasifican según el lugar y la forma de crecimiento: monte de galería, de ribera o ribereño —aquel que crece asociado a los cursos de agua permanentes—, conocido como monte de leña blanca.

Monte de parque: se llama así a aquel que crece esparcido en un área mayor sin depender del agua encauzada (montes de espinillo y algarrobo del litoral, monte de leña negra).

Monte serrano: crece asociado a la pedregosidad generada por afloramientos graníticos (compuesto fundamentalmente por coronillas).

Monte de ladera: asociado a fuertes pendientes caen las laderas de los cerros mesetiformes de Tacuarembó.

Monte de quebrada: asociado a fuertes pendientes en la parte más cercana a las nacientes de muchos cursos de agua de Lavalleja y Treinta y Tres. Evoluciona aguas abajo a montes de galería.

Palmar: monte compuesto por palmeras (*Butiá capitata* en Castillos y *Butiá yatay* en Quebracho).

Rocosidad: se llama así al fenómeno de afloración de rocas en la superficie del campo. En una observación rápida se estima la cantidad según el área que cubren: abundante, moderada o nula.

Pedregosidad: se denomina campo pedregoso aquel que tiene, tanto en la superficie como en el perfil, abundantes fragmentos rocosos. Estos generalmente no se ven en foto aérea. Difiere de rocosidad.

Escarpa: se trata de un accidente geográfico típico de afloramientos de rocas duras que se acomodan en capas horizontales (basaltos, areniscas silicificadas). Es una barranca elongada de centenas de metros dispuesta como una terraza a nivel (Areniscas de Mercedes, Basaltos de Arapey, Areniscas de Tres Islas).

Falla: la tierra está compuesta en la superficie por rocas rígidas que se rompen en bloques y se desplazan a consecuencia de movimientos generados en el interior del globo terráqueo. Estas roturas se denominan fallas y generan planos sobre los cuales se desplaza un bloque contra otro. Generalmente en la superficie de la falla se emplazan cursos de agua que quedan controlados.

Diaclasas: son roturas o fisuras que dividen la roca y que no implican desplazamientos perceptibles de los bloques que se encuentran a uno y otro lado del plano de debilidad.

Erosión: proceso por el cual se produce el arranque del material para que quede en condiciones de ser transportado.

1.6. Ejercicios

1. ¿A qué longitud en grados sexagesimales corresponde la siguiente longitud: 59^G 50’ w?
2. ¿A qué latitud en grados centesimales corresponde la latitud 35° 10´30” s?
3. ¿A qué latitud en grados sexagesimales corresponde la latitud 37^G 00´ s?
4. ¿A qué longitud en grados centesimales corresponde la longitud: 55° 00´10” w?
5. Calcule el área comprendida entre los puntos A (356,577 km; 6215,222 km) B (359,005 km; 6216,144 km) y C (357,055 km; 6220,214 km). Exprésela en metros cuadrados, hectáreas y kilómetros cuadrados.
6. Dadas las siguientes coordenadas de puntos de la República Oriental del Uruguay:

Punto	CPx (km)	CPy (km)	Latitud	**Longitud**
Ataques	541,594	6549,266	31° 11’ 52”	55° 21’ 50”
Montevideo Chico	436,240	6435,330	32° 13’ 27”	56° 28’ 36”
Bernabé Rivera	387,624	6648,436	33^G 66’ 51”	63^G 29’ 85”
El Eucalipto (Paysandú)	361,232	6470,068	35^G 44’ 90”	63^G 63’ 02”
Faro Punta Carretas	467,085	6134,871	38^G 81’ 60”	62^G 40’ 06”
Desembocadura del arroyo Valizas	685,456	6199,021	38^G 15’ 55”	59^G 76’ 11”

   a. Transforme el par de coordenadas geográficas sexagesimales de Ataques y Montevideo Chico a centesimales.
   b. Transforme las coordenadas geográficas centesimales de El Eucalipto, Bernabé Rivera y el faro de Punta Carretas a sexagesimales.
   c. ¿Cuál es la distancia mínima entre Montevideo Chico y El Eucalipto?
   d. Calcule el área del polígono con vértices en Ataques, El Eucalipto, el faro de Punta Carretas y la desembocadura del arroyo Valizas. ¿Qué porcentaje del área territorial del Uruguay está considerando?

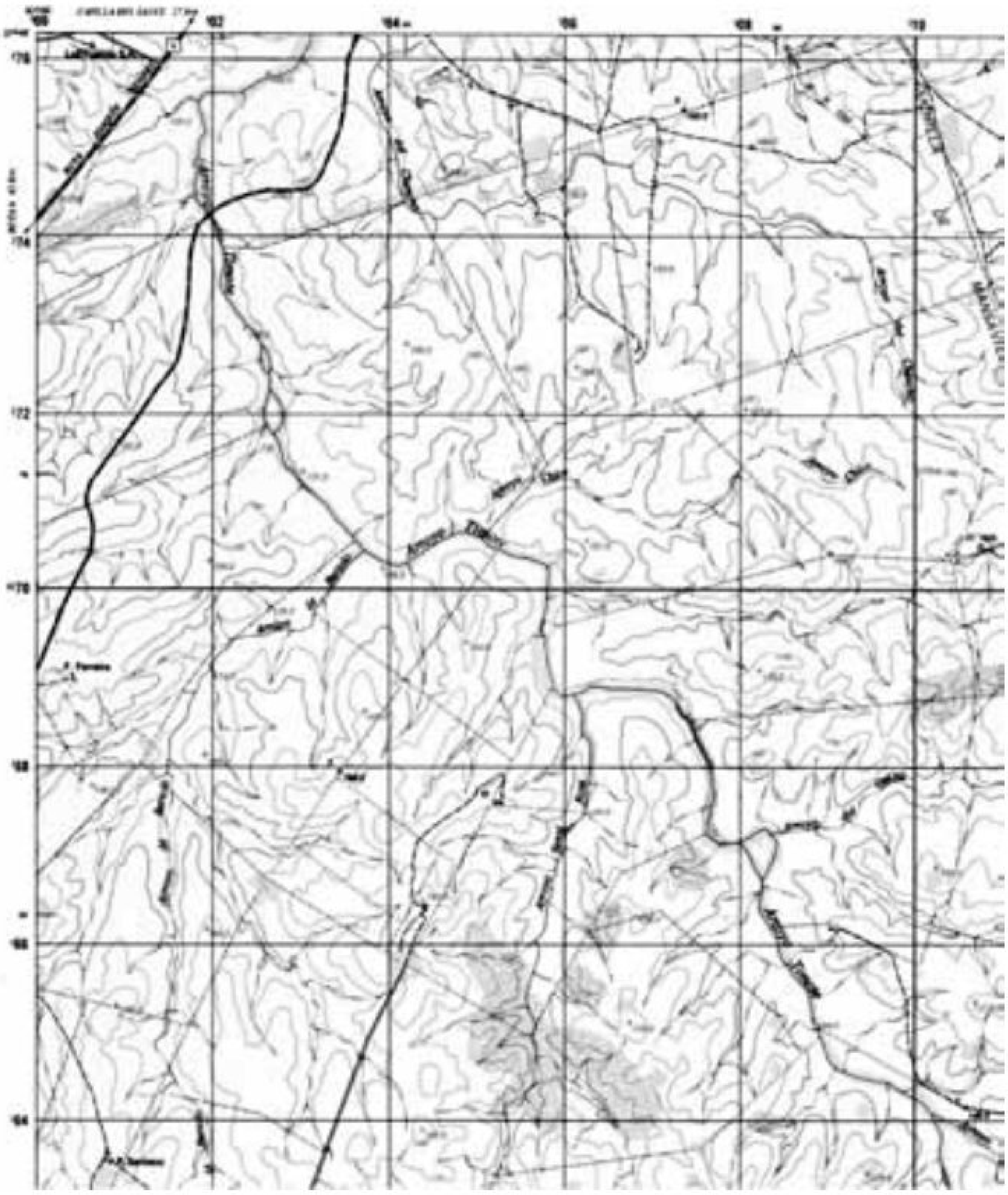
7. Los siguientes cinco puntos, dados por sus coordenadas planas con resolución métrica, definen los vértices de un predio:

   Es conveniente, antes que nada, ubicarlos gráficamente sobre un papel cuadriculado a escala 1/50.000.

   a. ¿Cuántos metros de alambre son necesarios para alambrar el predio (7 hilos)?
   b. Si entre pique y pique se dejan dos metros: ¿cuántos piques son necesarios?
   c. Considere que un pique tiene una sección transversal de 5 cm y una altura de 1,5 m. ¿Qué volumen de madera se necesita?
   d. ¿Qué área tiene el predio? Exprésela en m^2, ha y km^2.
   e. En el punto medio del lado ab está la portera de acceso al predio. Determine sus coordenadas planas.

f. A un cuarto de distancia entre el punto b y d (partiendo del primero) está el casco de la estancia. Calcule las coordenadas planas.
g. ¿Qué distancia hay, en línea recta, entre la portera y el casco?
h. Se quiere hacer un camino de tres metros de ancho y diez centímetros de espesor entre la portera y el casco con un préstamo de tosca (densidad = 1,5 g/cm^3) de una cantera vecina. Para ello se cuenta con un camión que es capaz de transportar como máximo ocho toneladas: ¿cuántos viajes serán necesarios?
i. A mitad de camino entre a y d está el pozo semisurgente capaz de erogar 5600 litros por hora. ¿Cuántos metros de plastiducto se necesitan para llevar el agua desde el pozo hasta el casco?
j. Junto al casco hay un tanque australiano de 15 chapas (14,9 m de diámetro) con una altura útil de 1,05 m. ¿En cuánto tiempo se llenará con la perforación semisurgente?
k. Sean los puntos F (406093 - 6183846) y G (406169 - 6184092). ¿Cuál de esos puntos pertenece al segmento AD? Justifique su respuesta.

8. La figura corresponde a un sector de la carta topográfica a escala 1:50.000 H-23 (Timote).



a. Recalcule la escala del documento.

b. Calcule el área del potrero limitado al nw por el Arroyo de Bartolo, al n por el Arroyo Timote, al sw por alambrado de rumbo N60W y al se por alambrado de rumbo N45E. Exprese las mismas en hectáreas. Utilice el método más conveniente para el cálculo.

c. Calcule el área del potrero que tiene por vértices:

1 = (504,3 km – 6274,4 km)
2 = (506,4 km – 6275,1 km)
3 = (506,8 km – 6272,0 km)
4 = (506,0 km – 6271,7 km)
5 = (505,8 km – 6271,4 km)

d. Calcule la pendiente entre los puntos A y C. Exprese las mismas en valor angular y porcentaje.

A = (501,9 km – 6270,0 km)
C = (503,1 km – 6271,3 km)

e. Realice los cortes topográficos entre los puntos X-Y. Utilice la escala vertical más adecuada.

X = (500,8 km – 6271,6 km)
Y = (504,7 km – 6272,6 km)

f. Calcule la longitud del corte utilizando Pitágoras, y el rumbo del mismo por medio de una línea trigonométrica.

g. Indique en el corte la ubicación de los cursos, divisoria de aguas y vaguadas.

9. Para realizar los siguientes ejercicios Ud. debe estar frente a un ordenador que tenga instalada una versión reciente del programa *Google Earth*.

A continuación se suministra una lista de coordenadas y una altura específica de observación. Ambos datos son variables que pueden ser especificadas en el *Google Earth*.

1. Centre la pantalla en las coordenadas que se indican, a la altura de observación especificada y describa lo que observa en el campo visual: latitud (-) s y longitud (-) w.

Obs.	Latitud (°)	Longitud (°)	Altura observación/Ojo
1	34°83´69,00˝	56°22´07,50˝	100 m
2	34°83´15,00˝	56°02´42,00˝	3000 m
3	34°85´74,00˝	56°08´38,00˝	500 m
4	34°76´67,00˝	56°25´47,00˝	500 m

2. Encuentre similitudes y diferencias en las cosas que se observan entre los pares de puntos siguientes:

Obs.	Latitud (°)	Longitud (°)	Altura observación/Ojo
5a	30°51´00,00˝	56°81´00,00˝	1500 m
5b	16°64´00,00˝	11°89´45,00˝	1500 m
6a	35°64´00,00˝	61°65´00,00˝	50000 m
6b	24°29´00,00˝	15°02´00,00˝	50000 m

3. Vaya al punto de coordenadas (-34°60´00,00˝; -54°94´38,00˝), colóquese a una altura de observación de 3000 m.

a. Indique el rumbo de la banda de rocas paralelas que está observando.
b. Mida el espesor aproximado de dicha faja.

Bibliografía recomendada

GANCIO, Fernando (1997), *Técnicas de cartografía aplicada en agronomía: Cartas topográficas.* Montevideo: Departamento de publicaciones de la Facultad de Agronomía (Código 450).

COMESAÑA, Héctor (1976), *Curso sobre fotogrametría.* Montevideo: Facultad de Ingeniería.

RUBE, Kurt (1963), *Fotogrametría,* Barcelona: Ed. Gili.

MULLER, Roberto (1947), *Compendio general de topografía teórico práctica,* 3 vol. Buenos Aires: Ed. Ateneo.

CAPÍTULO 2.

Minerales primarios

2.1.Cristaloquímica

Los minerales son compuestos químicos de origen natural y composición homogénea con una estructura interna definida. Esta estructura interna es determinada por la constitución química, pues depende de la cantidad y tamaño de los iones que componen la celda elemental que se repite dentro del volumen que ocupa el mineral.

En agronomía los únicos minerales que interesan son aquellos que existen en abundancia en la corteza terrestre. Se denominan primarios a los formados en condiciones de temperatura y presión más altas que las superficiales (20° C y 1 atm).

La corteza contiene todos los elementos químicos conocidos pero con muy diferente importancia relativa: 98% de ocho elementos mayores, 1% de cuatro elementos menores y 1% de los oligoelementos. La estimación más generalizada es la siguiente:

Tabla 1. Importancia relativa de los elementos que contiene la corteza terrestre

Elementos mayores		Elementos menores		Elementos traza	
Símbolo	%	Símbolo	%	Símbolo	ppm
O	46,2	Ti	0,7	Zn	132
Si	27,6	H	0,2	Ni	80
Al	8,1	Mn	0,1	Cu	30
Fe	5,1	P	0.01	Co	23
Ca	3,6			B	3
Na	2,8			Mo	2
K	2,6				
Mg	21				

Cada elemento químico integra edificios cristalinos. Los elementos mayores ocupan la mayoría de los lugares y los oligoelementos solo ocupan algunos en los minerales más abundantes (silicatos). Su aparición en superficie se produce porque se encuentran en el lugar de un elemento mayor de radio iónico similar.

En la tabla 2 se exponen los valores de radio iónico en Å de los elementos químicos de importancia agronómica y los parámetros derivados: potencial iónico (Φ) y fuerza electrostática de enlace (f.e.e), que son fundamentales para explicar la estabilidad de los minerales.

Tabla 2. **Radio iónico, potencial iónico y fuerza electrostática de enlace de los elementos de importancia agronómica**

Elementos mayores	Radio iónico (Å)	Valencia	Potencial iónico	Índice de coordinación	Configuración
C	0,3	4	13,5	3	Triángulo
Si	0,41	4	10	4	Tetraedro
Al	0,56	3	5,3	4-6	Tetraedro octaedro
Fe^{+++}	0,67	3	4,5	6	Octaedro
Fe^{++}	0,83	2	2,5	6	Octaedro
Mg^{++}	0,78	2	2,6	6	Octaedro
Ca^{++}	1,06	2	2	8	Cubo
Na^{++}	0,98	1	1	8	Cubo
K^{+}	1,33	1	0,75	12	Prisma hexagonal

Elementos menores	Radio iónico (Å)	Valencia	Potencial iónico	Índice de coordinación	Configuración
Ti	0,82	4	5	6	Octaedro
$H_3^{+}O$	1,33	1	0,7	12	Prisma hexagonal
Mn^{++}	0,91	2	2,2	6	Octaedro
Mn^{+++}	0,42	4	9,5	4	Tetraedro
P^{+5}	0,52	5	9	4	Tetraedro

Oligoelementos	Radio iónico (Å)	Valencia	Potencial iónico	Índice de coordinación	Configuración
Ni	0,78	2	2,6	6	Octaedro
Co	0,82	2	2,4	6	Octaedro
Zn	0,83	2	2,3	6	Octaedro
Mo	0,68	4	5,7	6	Octaedro
B	0,20	3	15.0	4	Octaedro

En la corteza se han reconocido 2800 minerales diferentes pero los únicos que tienen importancia agronómica son unos pocos **silicatos** que poseen como unidad estructural fundamental el tetraedro de Si-O.

2.2. Clasificación de silicatos

El método más adecuado es utilizar la disposición de las unidades tetraédricas y la forma como se unen entre sí. Ya en la década de los treinta (Strunz, 1938)[5] se propuso una clasificación que se aplica actualmente por la sencillez y practicidad. Se reconocen los siguientes tipos estructurales:

1. *Nesosilicatos* (neso = isla): los tetraedros de Si-O no comparten ningún oxígeno, están aislados entre sí y otros cationes hacen los enlaces. A este tipo pertenecen las olivinas o peridotos.
2. *Inosilicatos* (inos = fibra): los tetraedros se unen formando largas cadenas separadas entre sí, en el caso de los piroxenos, y unidas de a dos en el caso de los anfíboles.
3. *Filosilicatos* (filo = hoja): los tetraedros se unen en hojas de dos direcciones predominantes y los octaedros en sentido perpendicular, es el caso de las micas y los minerales arcillosos.
4. *Tectosilicatos* (tecto = andamios): los tetraedros se unen entre sí en todas direcciones. A este tipo pertenecen dos familias fundamentales: sílice y feldespatos.

Establecido el criterio de clasificación de los silicatos es posible pasar a realizar una descripción de las características más salientes de cada familia importante: peridotos, piroxenos, anfíboles, micas, sílice, feldespatos.

2.2.1. Peridotos

Son nesosilicatos, por lo que tienen como fórmula SiO_4^{-4}, donde las cargas negativas son compensadas por Mg^{++} o Fe^{++}. El mineral más común es la olivina, que es el término intermedio de una serie isomorfa. La olivina cristaliza en granos prismáticos de color verde botella, brillo vítreo y fractura concoidal. Es un mineral dominante en las rocas ultrabásicas y es común en muchos derrames basálticos sobre los que se desarrollan suelos profundos de alta fertilidad natural. Estos minerales no aceptan Al^{+++} en la estructura, en cambio es común la aparición de Ni^{+++} por diadojía en el centro de los octaedros.

2.2.2. Piroxenos

Son inosilicatos de cadena simple en los cuales cada tetraedro de $O^{=}$ comparte dos de sus vértices con tetraedros vecinos, dando fórmula general ($Si_2\ O_6^{-4}$).

---

[5] La clasificación de Strunz es un sistema usado universalmente en mineralogía, que se basa en su composición química. Fue creada en 1938 por el minerólogo alemán Karl Hugo Strunz y ajustada posteriormente —en 2004— por la International Mineralogical Assotiation (IMA). Como conservador del museo de minerales de la Friedrich Wilhelms Universität (denominada actualmente como Humboldt University of Berlin), Strunz se dedicó a ordenar la colección geológica del mismo en función de las propiedades químicas y cristalográficas de los ejemplares. Sus tablas mineralógicas, publicadas por primera vez en 1941, han sufrido diversas modificaciones a lo largo del tiempo, siendo publicada la novena edición en 2001. El sistema actual divide los minerales en nueve clases, que a su vez se dividen nuevamente en varias secciones, familias y grupos, de acuerdo con la composición química y la estructura cristalina de los ejemplares..

Las diferentes cadenas se disponen alternativamente con los vértices libres hacia uno y otro lado. Esa distribución determina cristales prismáticos con clivajes perpendiculares.

Las cadenas son unidas entre sí por iones Mg^{++} o Fe^{++} que tienen menor f.e.e. y por allí se producen los planos de clivaje.

El mineral más común es la *augita* que contiene una pequeña cantidad de Al^{+++} tetraédrico que permite el ingreso de Na^{+} y Ca^{++}. La fórmula más aproximada a la composición media sería la siguiente:

$$(Si_{1,8}\ Al_{0,2})\ O_6\ (Mg_{1,0}\ Fe_{0,8}\ Al_{0,2})\ Na_{0,1}$$

Este mineral constituye del 45 al 50% de los basaltos, que son las lavas más abundantes de la Tierra. Son minerales negros, en prismas cortos, brillo resinoso y clivajes perpendiculares.

2.2.3. Anfíboles

Son inosilicatos de cadena doble. Se desarrolla una tercera unión Si-O-Si respecto de los anteriores. La distribución de las cadenas genera clivajes a 120° y 60°, propiedad que puede verse a simple vista en cortes apropiados.

Son minerales que se desarrollan en prismas relativamente esbeltos, de color verde oscuro para la hornblenda, verde más claro para la actinolita y blanco para la tremolita.

La fórmula general es: $Si_8\ O_{22}\ (Mg, Fe)_5,\ Ca_2\ (OH)_2$

La hornblenda, el anfíbol más común e importante, tiene un cierto porcentaje de Al^{+++} en los tetraedros que permite ingreso de Na^{+}

La tremolita y la actinolita forman parte de una serie isomorfa con Ca^{++}.

Las fórmulas son:

$$Si_8\ O_{22}\ (Mg_1\ Fe)_5\ Ca_2\ (OH)_2, \text{ actinolita (verde)}$$
$$Si_8\ O_{22}\ Mg_5\ Ca_2\ (OH)_2, \text{ tremolita (blanco)}$$

La hornblenda es un mineral magmático que puede aparecer en granitos y algunos gabros, así como en rocas metamórficas derivadas de basaltos = anfibolitas. La actinolita es un mineral muy abundante porque integra el 40–50% de las prasinitas, que son rocas metamórficas derivadas de la transformación de los basaltos en condiciones de baja temperatura y presión.

2.2.4. Micas

Son filosilicatos fácilmente reconocibles porque desarrollan cristales tabulares hojosos. Se reconocen dos tipos principales:

Muscovita = mica blanca $[Si_3Al]\ O_{10}\ Al_2\ (OH)_2\ K$

Biotita = mica negra $[Si_3Al]\ O_{10}\ (Mg, Fe)_3(OH)_2K$

Se forman hojas de tetraedros de Si-O y octaedros de O-OH con centro de Al^{+++} en la muscovita y de Mg^{++}-Fe^{++} en la biotita.

2.2.5. Sílice

Esta familia está constituida por tetraedros de Si-O en todas direcciones, dando una fórmula general SiO_2. Los cuatro $O^=$ de cada tetraedro se unen a iones Si^{++++} dando así la relación Si/O = ½.

Dos minerales son importantes: *el cuarzo*, el más común de los minerales, y la *calcedonia* que es un mineral muy frecuente.

El *cuarzo* se presenta en cristales o masas irregulares, transparentes o blancos de muy alta dureza (raya vidrio y el acero de una navaja).

La *calcedonia* aparece en masas irregulares en los procesos de silicificación de areniscas y conglomerados, aunque el yacimiento más popular es en geodas de basalto. En este último caso se pueden formar ágatas por alternancia de capas de distinto color o diferente textura. También presenta alta dureza y fractura concoidal. El hábito mamelonar es característico.

2.2.6. Feldespatos

Es la familia más importante de minerales primarios formados a altas temperaturas o minerales formados a profundidad en la corteza, pues constituyen el 50% del conjunto de las rocas. La diferencia con la familia de la sílice es que contienen Al^{+++} en el centro de tetraedros y ello obliga el ingreso de Ca^{++}, Na^{+} o K^{+} para lograr la neutralidad de las cargas eléctricas de los iones.

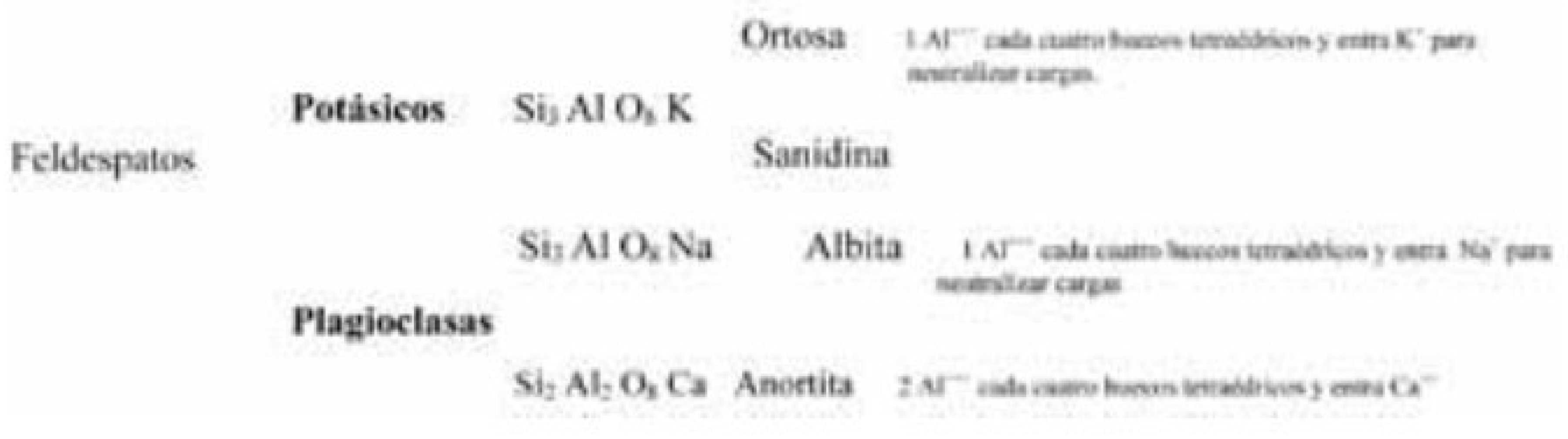

Feldespatos
Potásicos
Si₃ Al O₈ K
Ortosa
1 Al⁺⁺⁺ cada cuatro huecos tetraédricos y entra K⁺ para neutralizar cargas.
Sanidina
Plagioclasas
Si₃ Al O₈ Na
Albita
1 Al⁺⁺⁺ cada cuatro huecos tetraédricos y entra Na⁺ para neutralizar cargas
Si₂ Al₂ O₈ Ca
Anortita
2 Al⁺⁺⁺ cada cuatro huecos tetraédricos y entra Ca⁺⁺

Diagrama 1. Clasificación de los feldespatos

Los feldespatos **K⁺** comunes son tres clases: *ortosa u ortoclasa*, en rocas graníticas formadas en profundidad; *sanidina*, en rocas volcánicas y *microclina* en pegmatitas. Son principalmente reconocidos por un excelente plano de clivaje y una dureza superior a la del acero de un cortaplumas. Normalmente son rojos o rosados, pero hay grises, blancos y hasta casi negros. Una característica inconfundible para la ortosa es la presencia de una macla que divide el cristal en dos partes, una brillante y otra opaca.

2.3. Identificación

Con esos pocos minerales primarios se resuelven los problemas geológicos de interés agronómico tales como génesis de suelos, hidrogeología, isostasia, geomorfología, ecología del paisaje, carta ecológica.

La estructura de los minerales implica siempre un andamiaje tridimensional donde los $O^=$ ocupan el mayor volumen con esferas de 1,33 Å de radio iónico (1 Å $=10^{-8}$ cm). La distribución de los $O^=$ puede hacerse de cuatro formas:

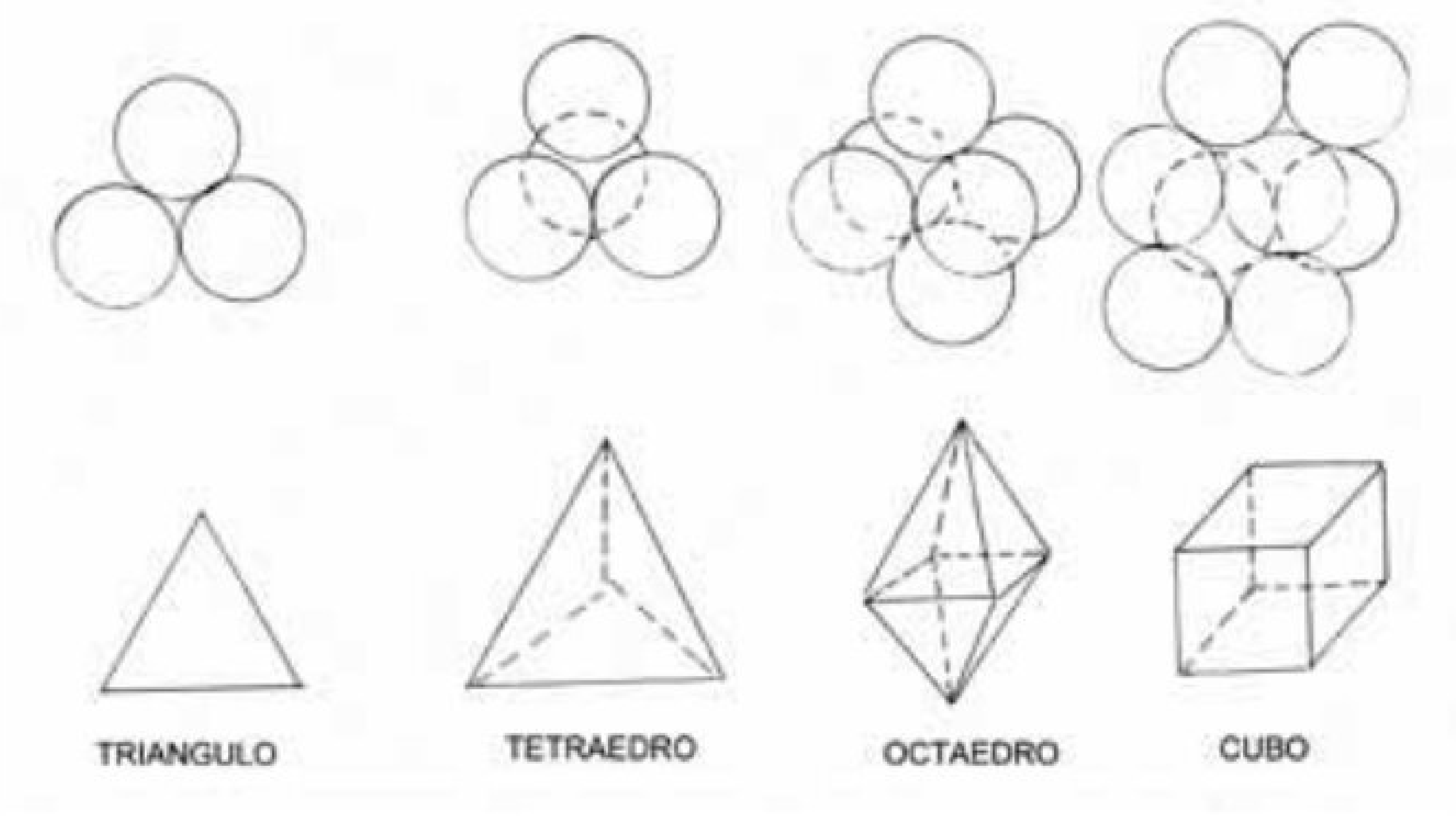
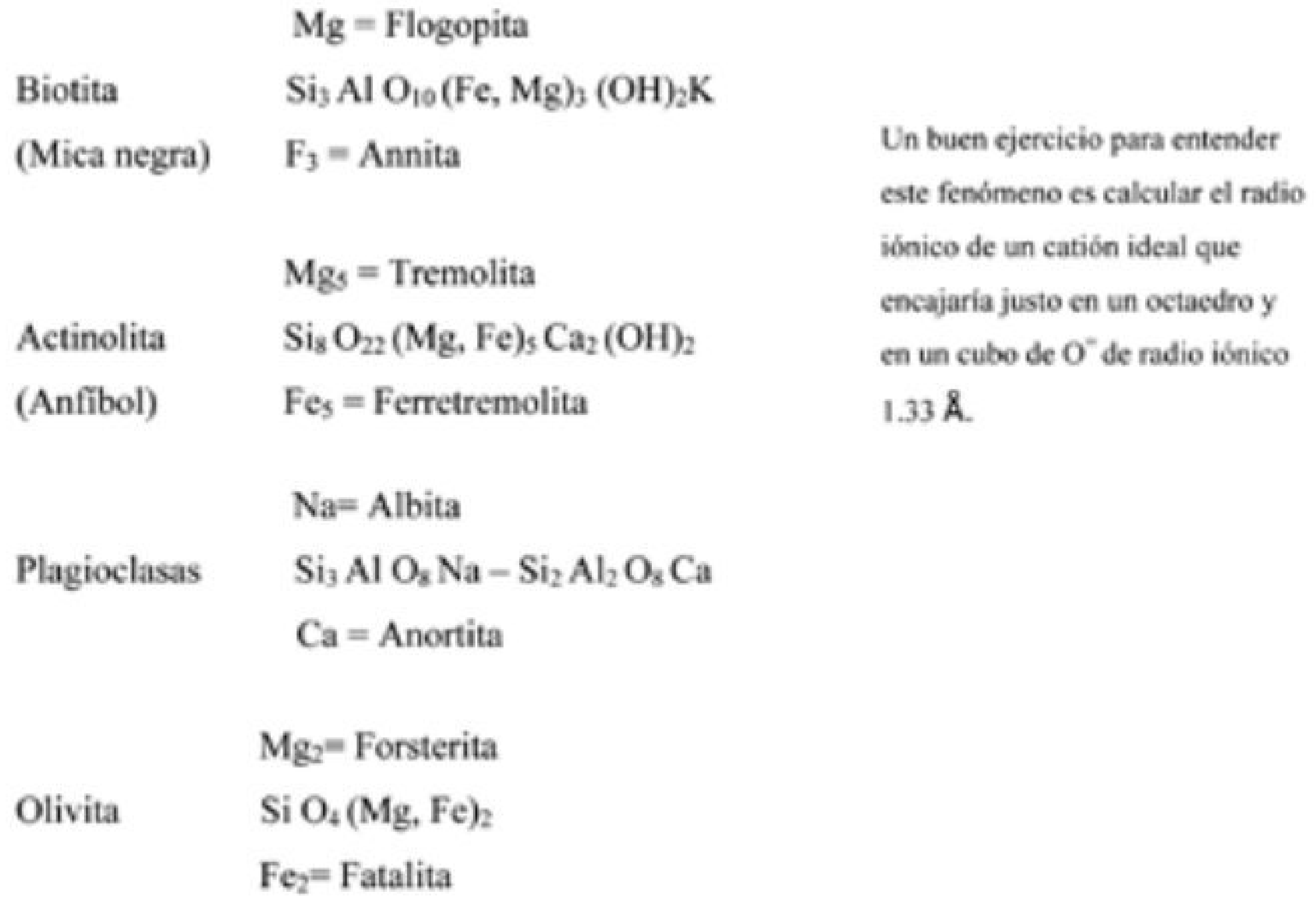


Figura 20. Distribución de los oxígenos en las diferentes estructuras minerales. Un buen ejercicio es armar estas estructuras con bolas de espumaplast de 2,5 cm de diámetro con la ayuda de mondadientes.

La coordinación tetraédrica es la fundamental de los silicatos. El centro del tetraedro puede ser ocupado por Si^{+4} o por Al^{+++}. En los octaedros, el centro puede ser ocupado por Al^{+++}, Mg^{++}, Fe^{++}, Fe^{+++}. El fenómeno por el cual una posición espacial puede ser ocupada por cualquier catión de radio iónico adecuado se denomina diadojía y los cationes son diádocos.

Para una determinada estructura pueden entrar varios iones y eso constituye una serie isomorfa. Prácticamente todos los minerales forman parte de series isomorfas y las especies comunes tienen una composición intermedia entre dos extremos:



Mg = Flogopita
Biotita $Si_3 Al O_{10} (Fe, Mg)_3 (OH)_2K$
(Mica negra) F_3 = Annita

Mg$_5$ = Tremolita
Actinolita $Si_8 O_{22} (Mg, Fe)_5 Ca_2 (OH)_2$
(Anfíbol) Fe$_5$ = Ferretremolita

Na= Albita
Plagioclasas $Si_3 Al O_8 Na - Si_2 Al_2 O_8 Ca$
Ca = Anortita

Mg$_2$= Forsterita
Olivita $Si O_4 (Mg, Fe)_2$
Fe$_2$= Fatalita

Un buen ejercicio para entender este fenómeno es calcular el radio iónico de un catión ideal que encajaría justo en un octaedro y en un cubo de $O^=$ de radio iónico 1.33 Å.

Diagrama 2. Series isomorfas de algunos minerales. Un buen ejercicio para entender este fenómeno es calcular el radio iónico de un catión ideal que encajaría justo en un octaedro y en un cubo de O= de radio iónico 1,33 Å.

El feldespato K^+, en cambio, tiene polimorfismo, lo que significa que forma distintos minerales de igual composición Si_3AlO_8K:

- Ortosa u ortoclasa (monoclínica).
- Microclina (triclínica).
- Sanidina (solo en riolitas).

De acuerdo con la composición química los minerales poseen determinadas propiedades que permiten su identificación. Para su reconocimiento a simple vista o lupa de mano, pueden usarse propiedades tales como: clivaje, fracturas, brillo, dureza, color, hábito, maclas.

Clivaje: es la propiedad de un mineral de romperse en planos perfectos que reflejan la luz cuando el mineral no está alterado. Esta propiedad se desarrolla en minerales con estructura anisótropa que permiten planos con enlace más intenso. Tienen clivaje excelente los feldespatos, las micas y la calcita.

Fracturas: son superficies de rotura irregulares, generalmente resultante de estructura con igual intensidad de enlace en todas direcciones. El típico mineral es el cuarzo.

Brillo: es una propiedad menos cuantificable. Se reconoce brillo graso para el cuarzo y vítreo para el feldespato.

Dureza: es una propiedad clave. Se debe usar un cortaplumas que tiene dureza 5 en una escala de 10. Los minerales comunes con dureza mayor a 5, son feldespato y cuarzo, entre ellos se diferencian por el clivaje de los feldespatos.

El *color* nunca es una propiedad definitoria, pero ayuda a identificar algunos minerales. En el cuarzo y los feldespatos no es significativo, pero es común que los feldespatos K+ sean rosados y las plagioclasas blancas o grises. En los filosilicatos, las micas se identifican por el color: la biotita es negra y la moscovita es blanca. Los ferromagnesianos son oscuros, excepto la actinolita que es verde.

El *hábito* se relaciona con la forma geométrica de los minerales. Se reconoce hábito hojoso en las micas, acicular en la actinolita, prismático en los feldespatos y columnar en la hornblenda. Esta propiedad permite diferenciar la biotita de los demás minerales ferromagnesianos (hornblenda, augita) pues, rayado con un cortaplumas, caen laminillas negras.

Tabla 3. Claves para la determinación de los minerales de importancia agronómica

Clivaje	Color	Dureza	Brillo	Hábito	**Mineral**
Muy bueno	Claro	> 5	Vítreo	Prismático	Feldespato
	Negro	< 5	Vítreo	Hojoso	Biotita
Bueno	Gris	< 5	Vítreo	Hojoso	Moscovita
	Claro	< 5	Vítreo	Prismático	Calcita o Dolomita
Pobre	Oscuro	~ 5	Vítreo	Prismático	Hornblenda
	Verde	~ 5	Vítreo	Acicular	Actinolita
Nulo	Gris	> 5	Graso	Mamelonar	Calcedonia
	Variable	> 5	Vítreo	Irregular	Cuarzo
	Rojo	< 5	Mate	Terroso	Hematina
	Pardo amarillento	< 5	Mate	Terroso	Limonita

2.4. Ejercicios

Conteste brevemente las siguientes preguntas utilizando la bibliografía que sugiere cada una.

1. ¿Cuáles son, según Dercourt y Paquet (1978), las características generales de los silicatos?
2. ¿Cuál es la diferencia entre ortoclasa y microclina según Read y Watson (1975)?
3. ¿Cuáles son los tres componentes principales de la familia de los feldespatos y cómo pueden explicarse, según Read y Watson (1975)?
4. ¿Cómo definen Meléndez-Fúster (1984) a las micas?
5. ¿Cuáles son las propiedades de los piroxenos citadas por Gilluly *et al.* (1964)?
6. Defina clivaje, basándose en Heller y Sola (1967).
7. Defina mineral según Ernst (1974).
8. ¿Cómo diferencia el feldespato K^+ de una plagioclasa?
9. ¿Cómo diferencia el feldespato K^+ de un cuarzo?
10. ¿Cómo diferencia ortosa de ortoclasa?
11. Indique el nombre de la mica con Al^{+++} en la capa octaédrica.

Bibliografía recomendada:

DERCOURT, Jean, Jacques PAQUET (1978), *Geología.* Barcelona: Ed. Reverté.
ERNST, W. (1974), *Los materiales de la Tierra*. Barcelona: Ed. Omega.
GILLULY, James; Aaron WATERS; Alfred WOODFORD (1964), *Principios de Geología*. Bilbao: Ed. Aguilar.
HELLER, Robert, Oswald SOLA (1967), *Geología y ciencias afines*. México: Ed. Uthea.
MELÉNDEZ, Bermudo, José FÚSTER (1984), *Geología*. Madrid: Ed. Paraninfo.
ORTIZ, Alejandra (2009), *Glosario de geología e hidrogeología.* Montevideo: Facultad de Agronomía.
READ, H., Janet WATSON (1975), *Introducción a la geología*. Madrid: Ed. Alhambra.

CAPÍTULO 3.

Rocas ígneas

Las rocas ígneas son asociaciones de minerales que se forman a partir de un magma por enfriamiento. Un magma es una mezcla de silicatos en estado de fusión. Esta fusión se produce en zonas especiales por aumento de temperatura o disminución de presión.

La tierra está constituida por diferentes materiales en capas concéntricas:

- *Corteza:* la más externa compuesta por Si-Al-O con espesores de < 70 km, densidad 2,6 ton/m^3.
- *Manto superior:* sólido de 700 km de espesor, compuesto por Si-Fe-Mg-O; densidad 3,3 ton/m^3.
- *Manto inferior:* plástico de 2200 km de espesor, compuesto por silicatos ferromagnesianos.
- *Núcleo:* de 3000 km de radio, compuesto por Fe-Ni metálicos.

La corteza y el manto superior forman la Litósfera.

Existen diversos mecanismos de fusión de rocas pero los más importantes son dos:

- Fusión en la base de la corteza terrestre: cuando se forman masas continentales de gran tamaño que dificultan la eliminación del calor interior de la Tierra, se dilata el manto, raja la corteza y la disminución de presión permite fundir al manto superior. El magma generado es básico (50% de SiO_2) y produce principalmente basaltos.
- Hundimiento de placa oceánica (subducción) y generación de magma ácido (70% SiO_2) por fusión parcial de la corteza profunda o sedimentos arrastrados por la placa oceánica.

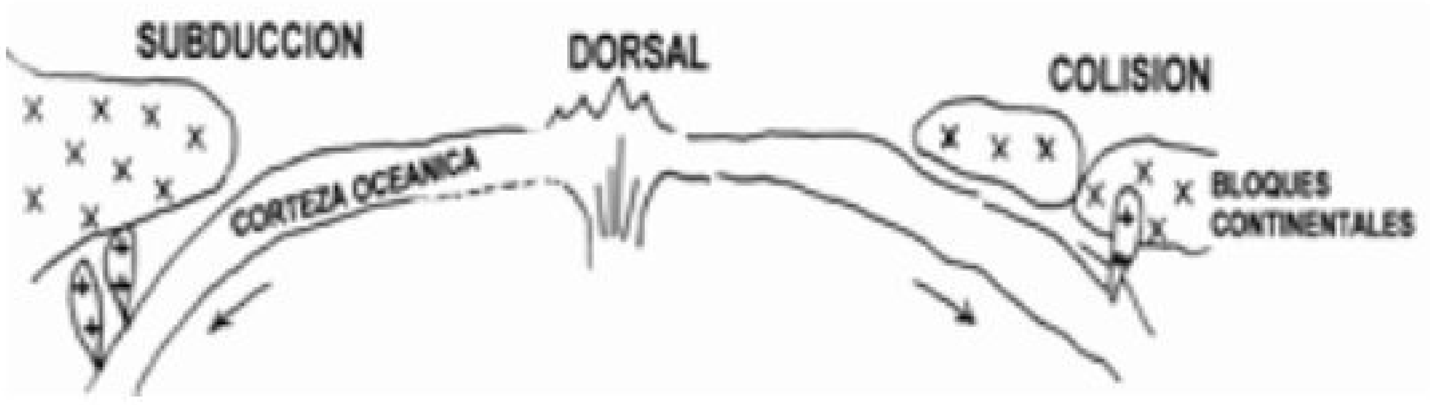


Figura 21. Subducción y colisión.

Cuando el magma se enfría se cristalizan las rocas ígneas. Cuando lo hace en profundidad el enfriamiento es lento y se pueden formar cristales de gran tamaño; resultan rocas de textura *granuda* (fanerítica), normalmente con granos de cinco milímetros, pero pueden llegar a varios centímetros. Cuando se enfrían bruscamente por erupción volcánica el tamaño del grano es muy pequeño y resulta una textura **afanítica**. En el primer caso se forma un cuerpo ovoide en el interior de la corteza que, cuando aflora por erosión de las capas superiores, proporciona una estructura geológica discordante con las rocas encajantes.

En el segundo caso se producen derrames superficiales y resultan capas volcánicas poco espesas y muy extensas.

Existe un tercer lugar de cristalización, en filones de pocos metros de espesor (1-20) y gran extensión en las otras dos dimensiones. El cuerpo se denomina filón y la textura es *porfírica* porque hay dos etapas de cristalización.

A modo de síntesis, que permite registrar las distintas condiciones de cristalización de un magma, se expone en la figura 22 un esquema de ubicación de las diferentes rocas en un corte geológico.

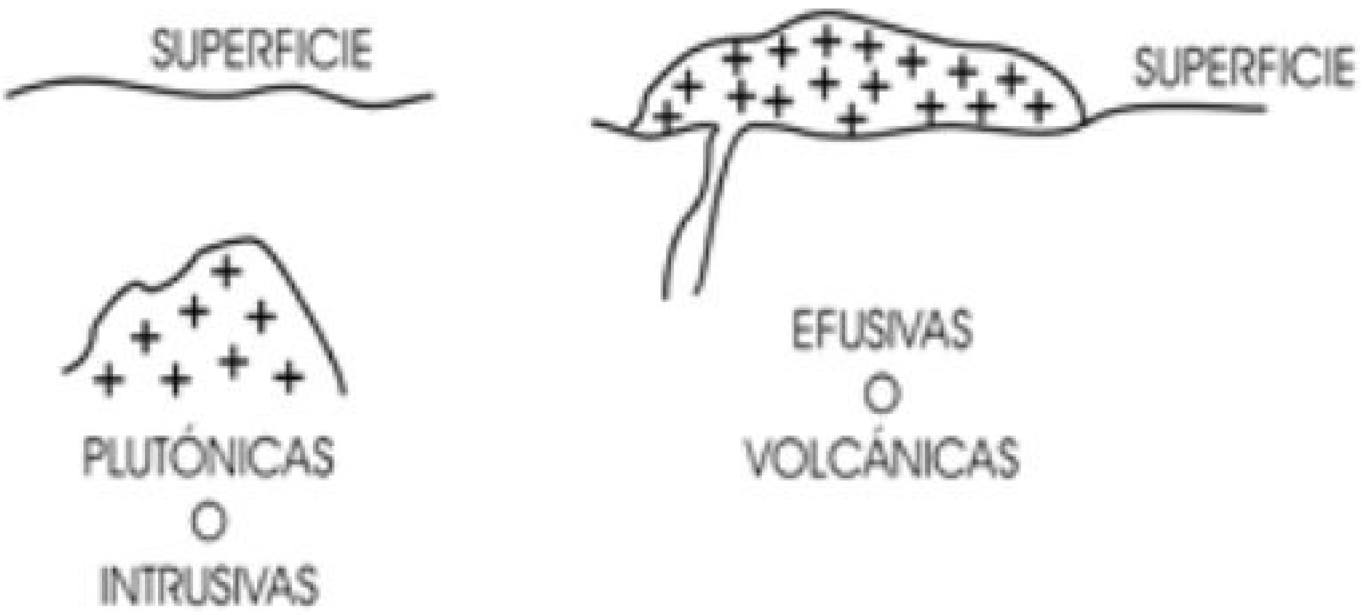


Figura 22. Diferentes condiciones de cristalización del magma

Otro elemento de clasificación es la *composición mineralógica* que, junto con la textural arriba señalada, permite definir las rocas ígneas de interés agronómico.

Tabla 4. Clasificación de las rocas ígneas según su composición mineralógica

Textura	Mineralogía			
	con cuarzo		sin cuarzo	
	Feldespato K^+	Plagioclasa	Feldespato K^+	Labrador
Granuda	granito	granodiorita	sienita	gabro
Porfírica	microgranito		microsienita	dolerita
Afanítica	riolita	dacita	traquita	basalto

Las pegmatitas son rocas filonianas con enormes cristales de cuarzo y feldespato, a veces con mica en láminas de hasta 20 cm de diámetro. Su origen es variado, pero una modalidad es la generación desde un cuerpo granítico.

De todas esas rocas las que más abundan son el granito y el basalto. La famosa frase de Strekeisen «mucho granito poca riolita, mucho basalto poco gabro», da cuenta de esa abundancia relativa que también en Uruguay se cumple y determina las dos rocas más importantes a estudiar en agronomía: *basalto* y *granito.*

3.1. Clasificación de las rocas ígneas

En función de la posición donde se enfría el magma se presenta a continuación su clasificación en intrusivas, filonianas y extrusivas, citando además ejemplos de rocas para cada uno de los casos.

3.1.1. Rocas intrusivas o plutónicas

Las rocas intrusivas o plutónicas son aquellas que cristalizaron en profundidad. Presentan textura granuda, ya que el descenso gradual de la temperatura permite que los minerales se desarrollen. Dentro de las rocas intrusivas se destacan las siguientes:

- *Granitos:* roca ácida con 75% de SiO_2, de colores grises o rosados, con textura granuda, de grano grueso formada por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita. Son las rocas más abundantes de la corteza terrestre.
- *Sienitas:* rocas de colores rosados. Se diferencian del granito porque no presentan cuarzo. Se compone de feldespato potásico, plagioclasa, hornblenda y biotita.
- *Gabros:* rocas oscuras o verdosas, de grano grueso, compuestas de plagioclasa básica y piroxenos como minerales esenciales. Son frecuentes las variedades con hornblenda y olivina.

3.1.2. Rocas hipabisales o filonianas

Las rocas hipabisales o filonianas son aquellas que cristalizaron a profundidad intermedia, en filones, sills o diques. La textura de estas rocas es porfírica, caracterizada por la presencia de gruesos cristales sobre una matriz de grano fino.

En Uruguay cobran importancia los filones de «granito negro» (microgabros) del Terreno Piedra Alta.

- *Microgabro:* se desarrolla como filones de varios kilómetros de longitud. Esta roca está compuesta por labrador (plagioclasa) y augita.
- *Pegmatitas:* se presentan en filones y diques. Están compuestas por cuarzo, feldespato y micas, así como también pueden contener turmalina.

3.1.3. Rocas extrusivas o volcánicas

Se presentan generalmente en mantos o coladas recubriendo grandes extensiones de la superficie terrestre. Se agrupan en una serie que van desde las más ácidas a las más básicas, comprenden: riolitas, traquitas, andesitas y basaltos. Las rocas ácidas son de tonos claros y poco densas, mientras que las básicas son más oscuras y muy densas.

- *Riolitas:* rocas amarillentas, grises o verdosas, compuestas por fenocristales de feldespato potásico y cuarzo.
- *Traquitas:* rocas de color gris ceniza o amarillentas, ásperas al tacto. Se componen de fenocristales de sanidina y plagioclasa y alguno de piroxeno.

- *Andesitas:* rocas porfíricas de color gris, a veces casi negras, ásperas al tacto, compactas o algo porosas, compuestas de fenocristales de plagioclasa, andesina, anfíbol y piroxeno.
- *Basaltos:* rocas negras, compactas y pesadas, compuestas esencialmente de labrador (plagioclasa) y augita; presentan olivina como mineral accesorio. Los fenocristales de plagioclasa son raros, pero son frecuentes los de augita y olivina.

3.2. Clasificación química de las rocas ígneas

En lo referente a clasificación química, el elemento más importante es el contenido, en porcentaje, de SiO_2 en peso. Se clasifican en ácidas cuando tienen > 65% de SiO_2, básicas cuando tienen alrededor de 60% de SiO_2 y ultrabásicas cuando tienen menos de 50% de SiO_2 en peso.

En las rocas ácidas dominan cuarzo y feldespato K^+, son los granitos que pueden tener minerales accesorios como biotita, muscovita u hornblenda. En las rocas básicas dominan augitas (piroxenos) y labrador, que son los componentes esenciales de los basaltos. En las rocas ultrabásicas el mineral dominante es la olivina.

3.3. Estructuras geológicas en rocas ígneas

Los granitos pueden presentar por lo menos cuatro estructuras geológicas en función de las condiciones en que fueron formados:

Batolitos:

- *en sitio:* núcleos de fusión a gran profundidad;
- *intrusivos:* se desplazan hacia arriba e intruyen las rocas metamórficas.

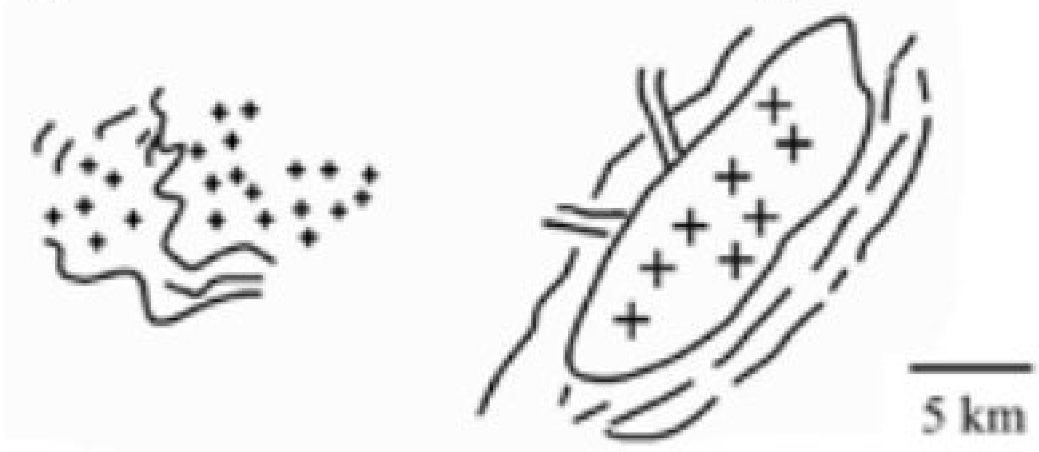


Figura 23. Representación esquemática de los batolitos

Lacolitos:

- *concordantes;*
- *discordantes.*

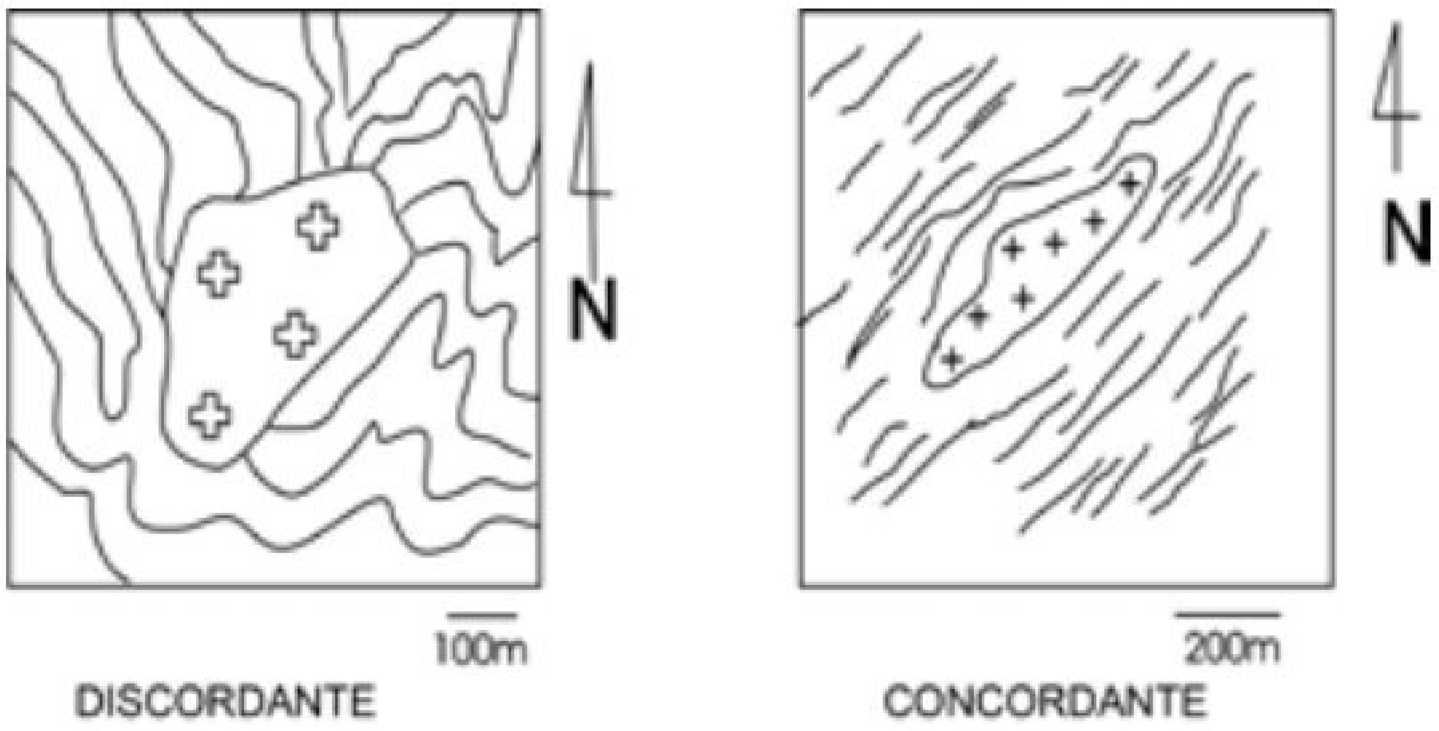

N
N
100m
200m
DISCORDANTE
CONCORDANTE

Figura 24. Representación esquemática de los lacolitos

Los gabros presentan predominio de estructura concordante. En Uruguay aparecen fundamentalmente en dos estructuras: facolito y filón capa.

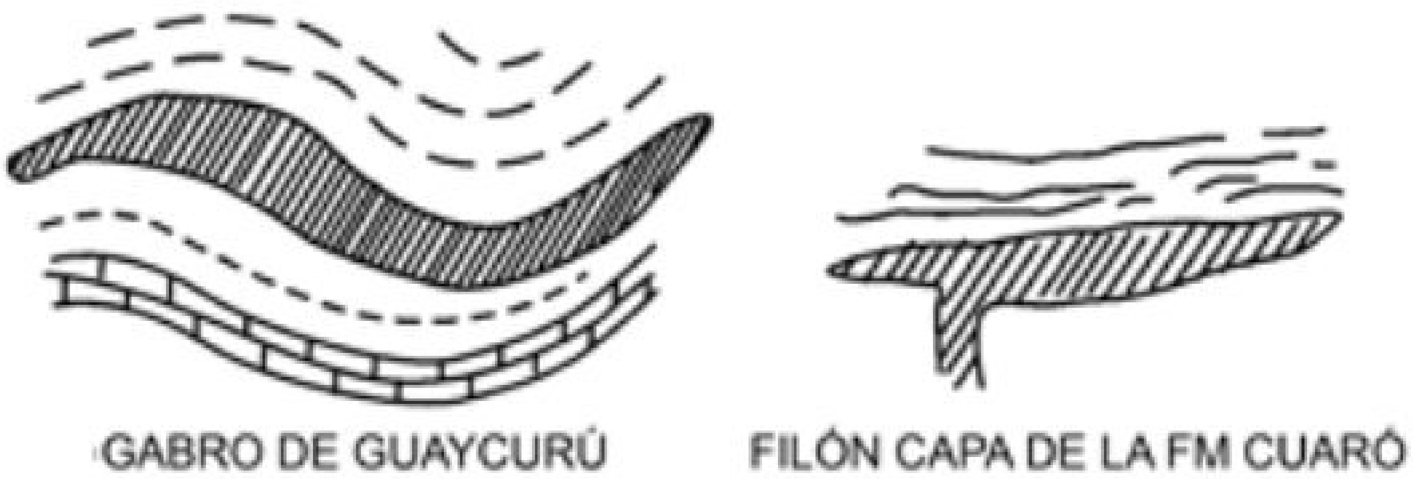

GABRO DE GUAYCURÚ
FILÓN CAPA DE LA FM CUARÓ

Figura 25. Facolitos y filón capa

Las riolitas forman coladas espesas y poco extensas: Arequita, La Salamanca, Sierra de Ríos.

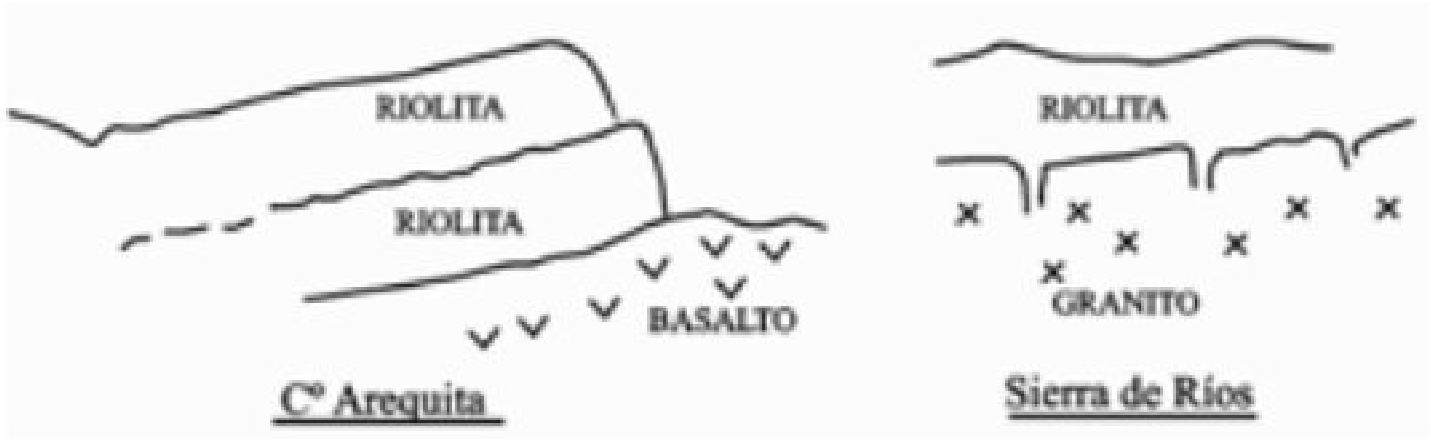

RIOLITA
RIOLITA
BASALTO
Cº Arequita
RIOLITA
GRANITO
Sierra de Ríos

Figura 26. Coladas espesas de riolitas en Uruguay

Los basaltos se desarrollan en coladas de 20-40 m de espesor y decenas de km^2 de extensión. Se estudian muy fácilmente en Uruguay porque responden muy bien a los fenómenos de erosión diferencial y se pueden detectar con precisión en fotos aéreas 1/40.000 y 1/20.000 (ver figura 28).

En el diagrama siguiente se muestra de manera esquemática un derrame.

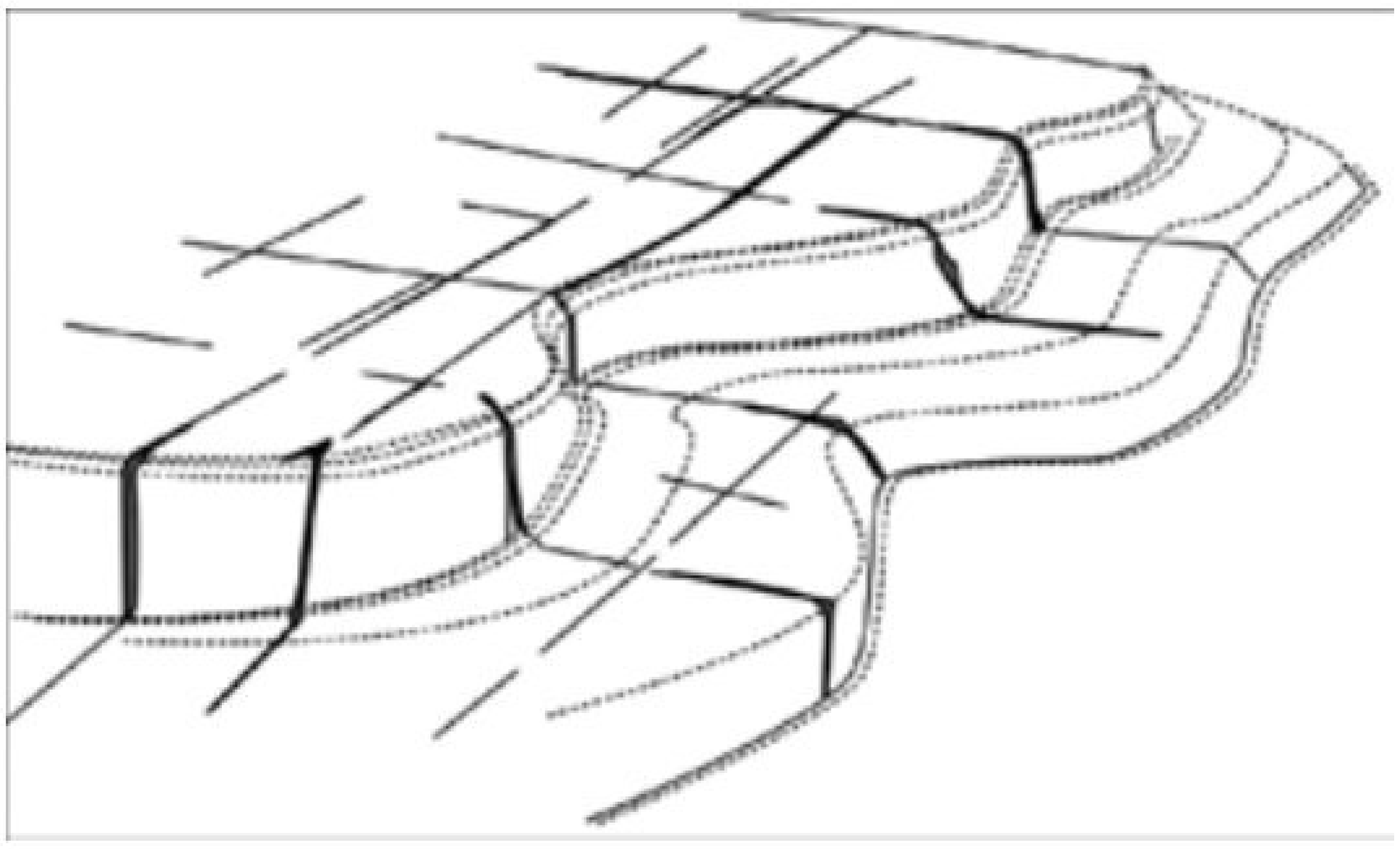


Figura 27. Esquema de derrames basálticos

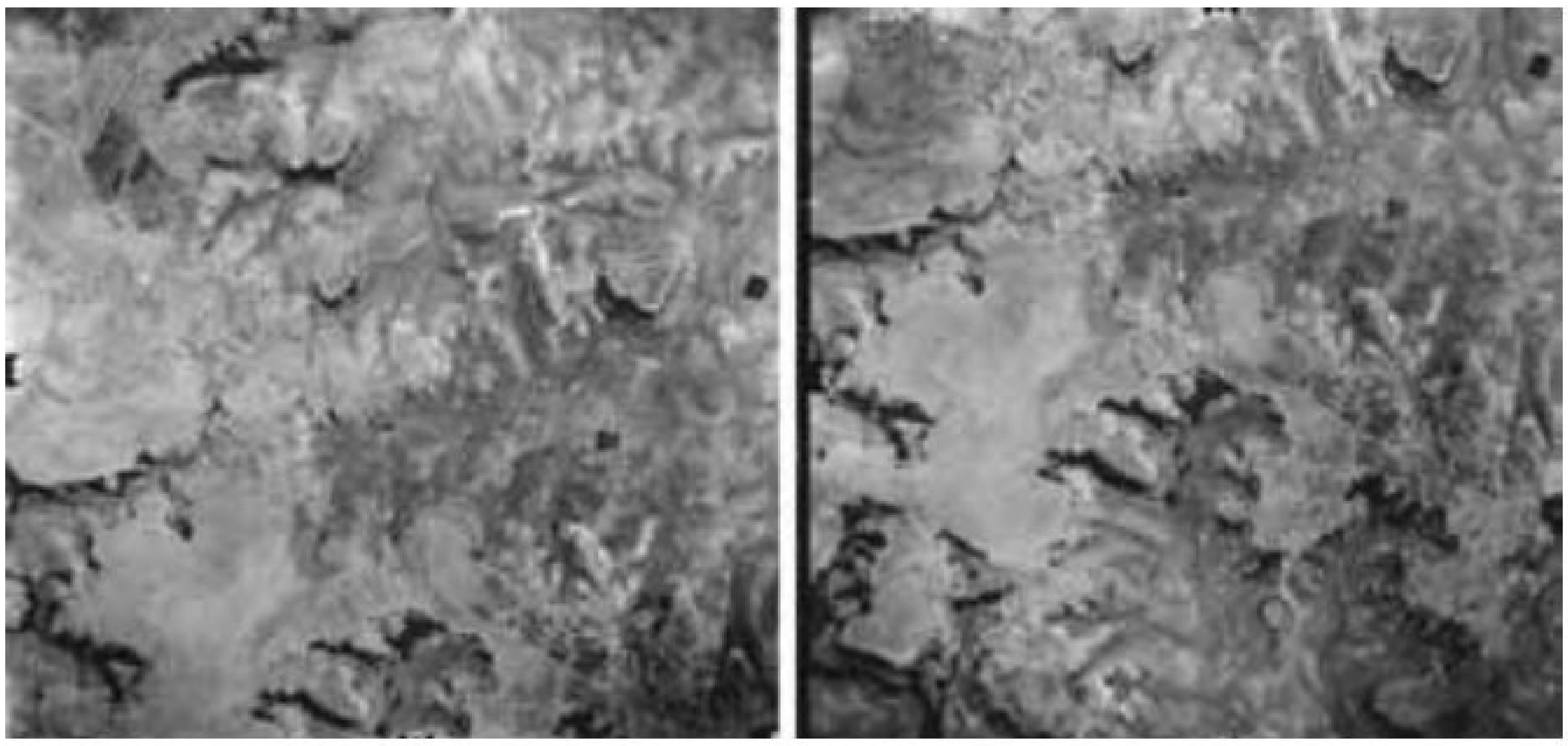


Figura 28. Vista de derrames basálticos en fotos aéreas

Los problemas relativos a filones se reducen a:

- rumbo y buzamiento;
- longitud y espesor.

Aquí es necesario volver al capítulo 1, donde fue tratado en detalle los temas rumbo y buzamiento.

En los esquemas siguientes se muestra la representación de un filón en un diagrama de bloque y en las cartas geológicas, así como también en foto aérea.

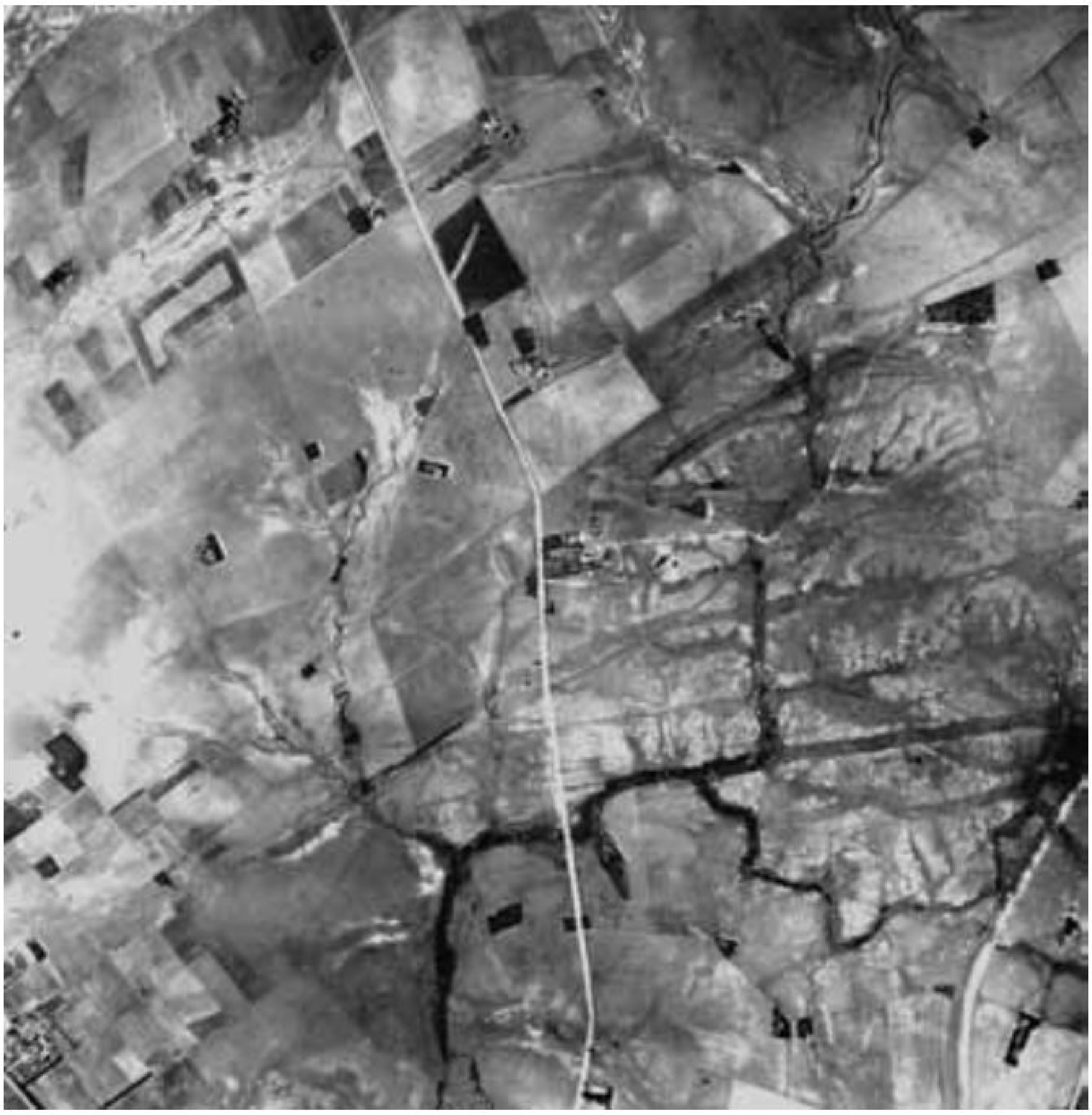


Figura 29. Representación esquemática de los filones y vista de los mismos en foto aérea

3.4. Ejercicios

Conteste brevemente las siguientes preguntas utilizando la bibliografía que sugiere cada una.

1. Defina basalto y granito según Heller y Sola (1967).
2. ¿Cómo se clasifican las rocas ígneas? Para responder esta pregunta consulte Holmes (1962).
3. ¿Cómo clasifica Meléndez-Fúster (1984) las rocas plutónicas?
4. ¿Cuáles son, según Meléndez-Fúster (1984), los principales tipos de rocas filonianas?
5. ¿Cuáles son las rocas ígneas básicas según Read y Watson (1975)?
6. ¿Cómo define Read y Watson (1975) a las riolitas? ¿Y a las traquitas?
7. Dibuje el perfil completo de una colada basáltica.
8. ¿En qué se diferencia un gabro de un basalto?
9. ¿Cuál es la diferencia entre un basalto y un granito?

Bibliografía recomendada

BANDA TARRADELLAS, Enric, Montserrat TORNÉ ESCASANY (2000), *Geología*. Buenos Aires: Ed. Santillana.

HELLER, Robert, Oswald SOLA (1967), *Geología y ciencias afines*. México: Ed. Uthea.

HOLMES, Arthur (1962), *Geología física*. Barcelona: Ed. Omega.

MELÉNDEZ, Bermudo, José FÚSTER (1984), *Geología*. Madrid: Ed. Paraninfo.

ORTIZ, Alejandra (2009), *Glosario de geología e hidrogeología*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

READ, H, Janet WATSON (1975), *Introducción a la geología*. Madrid: Ed. Alhambra.

CAPÍTULO 4.

Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias se forman en condiciones superficiales como consecuencia de la compactación y cementación de los sedimentos que se acumulan en distintas zonas de la superficie de la corteza. Las condiciones de formación corresponden a las del medio en que se depositan.

La *diagénesis* es un proceso que engloba todos los cambios físicos, químicos y biológicos que sufren los sedimentos hasta convertirse en rocas sedimentarias. Los dos cambios diagenéticos son la compactación y la cementación.

La compactación de las partículas sueltas de los sedimentos se produce como consecuencia del aumento del peso de la columna de materiales suprayacentes al acumularse nuevos sedimentos en la cuenca. Al aumentar la presión se da una pérdida de la porosidad y un aumento de la densidad. Simultáneamente se produce la cementación, que consiste en la precipitación de material soluble aportado por el agua que circula a través de los poros del sedimento. Los cementos más comunes son el carbonato de calcio, la sílice, el óxido de hierro y la arcilla.

4.1. Clasificación de rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias se pueden clasificar, según el origen, en tres grupos: rocas detríticas, rocas químicas o bioquímicas y rocas orgánicas.

4.1.1. Rocas detríticas

Son formadas por la acumulación de fragmentos de rocas o minerales preexistentes que pueden haber sufrido distintos grados de alteración química. Dentro de las mismas se encuentran los conglomerados, las areniscas y las lutitas.

4.1.1.1. Conglomerados

Son rocas formadas por fragmentos grandes, del tamaño de cantos o grava, más o menos redondeados, englobados en una matriz de partículas más finas. Estos conglomerados son característicos de medios en los que el transporte es agresivo con ríos torrenciales o lenguas glaciales. Los conglomerados se reconocen fácilmente: son poco abundantes y suelen presentarse en las series de rocas sedimentarias como intercalaciones de espesor variable, con estructura de lente.

4.1.1.2. Areniscas

Son relativamente abundantes, con un tamaño de grano que oscila entre 2 y 0,06 mm y una composición muy variada. Se destacan según la composición mineralógica de los granos minerales y del tipo de cemento que los une. Se clasifican en:

- *Areniscas silíceas:* compuestas casi exclusivamente por granos de cuarzo y cemento silíceo o arcilloso que se forman por erosión lenta y fuerte alteración química de las rocas preexistentes.
- *Areniscas litíticas:* compuestas por fragmentos poco rodados de rocas, feldespatos parcialmente alterados y cantidades de cuarzo unidos por cemento de tipo arcilloso.
- *Areniscas feldespáticas o arcosas:* compuestas por granos de cuarzo y feldespato unidos por cemento calcáreo que se forman a partir de rocas graníticas que han sufrido poca alteración química.

Para las rocas detríticas se utilizan como criterios de clasificación el tamaño de grano, la selección, forma de los granos, mineralogía y cemento.

El tamaño de grano es el criterio principal por el que se clasifican las rocas detríticas. En el siguiente cuadro puede visualizarse dicha clasificación.

Tabla 5. Clasificación de rocas detríticas en función del tamaño de grano

Diámetro		Clase	Roca
mm	micras		
4096	--	Bloques	Psefitas
256	--		
64	--		
4	--	Cantso	
2	--		
1	--	Arena muy gruesa	Psamitas
0,5	500	Arena gruesa	
0,25	250	Arena media	
0,125	125	Arena fina	
0,062	62	Arena muy fina	
0,031	31	Limo grueso	Limolitas
0,016	16	Limo medio	
0,008	8	Limo fino	
0,004	4	Limo muy fino	
		Arcilla	Lutitas

La selección describe la variabilidad del tamaño de grano en rocas detríticas. Éstas pueden clasificarse como:

- bien seleccionadas: cuando la roca muestra una sola clase granulométrica y el tamaño de las partículas es similar;
- mal seleccionadas: cuando presentan gran diversidad de tamaño de las partículas.

La selección es una propiedad que condiciona la porosidad de la roca y, por consiguiente, su comportamiento frente a la circulación de agua (superficial o subterránea).

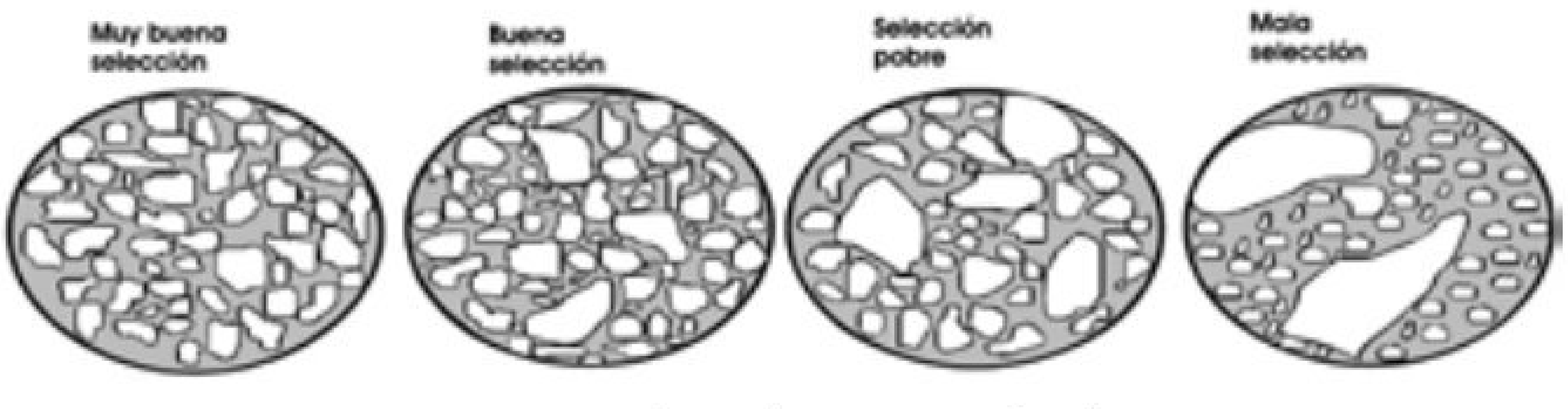


Figura 30. Selección en rocas detríticas

En lo que refiere a la forma de los granos es necesario definir dos conceptos: redondez y esfericidad.

Redondez: se refiere a la morfología de los granos. Es el dato morfológico de interés en la tipificación del ambiente de sedimentación de algunas rocas sedimentarias como las psefitas y las psamitas.

Esfericidad: está relacionada con las diferencias existentes entre los distintos diámetros o longitudes de los ejes de la partícula.

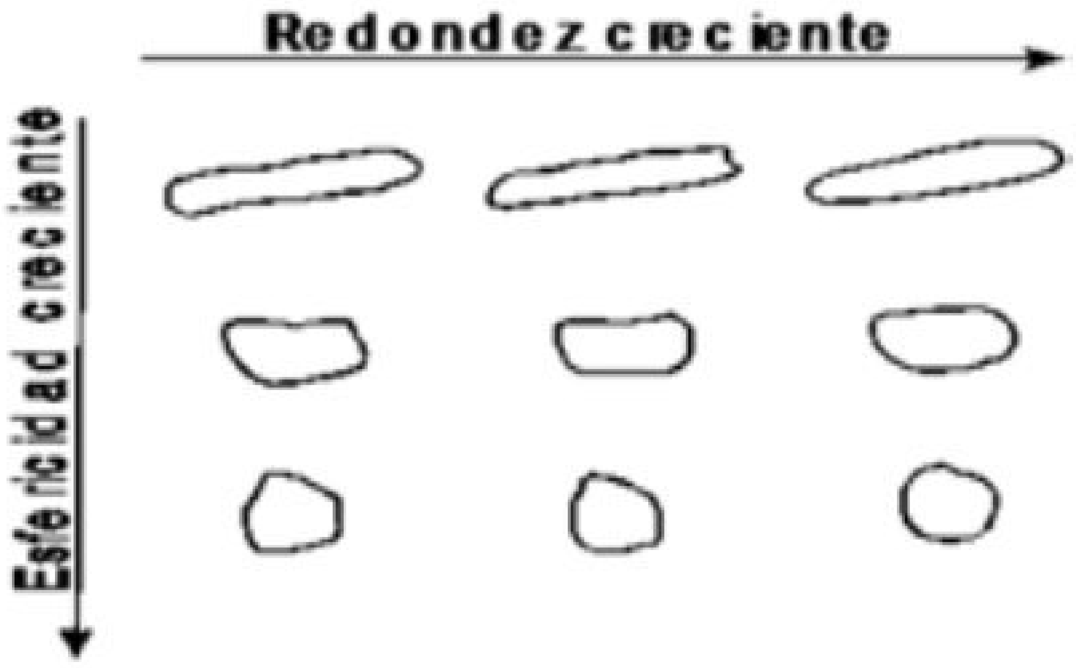


Figura 31. Redondez y esfericidad

Los **cementos** son sustancias que llenan los vacíos que existen entre partículas, eliminando total o parcialmente la porosidad inicial. La cementación es el proceso por el cual el sedimento pierde porosidad por precipitación química del cemento en los intersticios entre los granos. Los cementos pueden tener un tamaño de grano variable, mayor o menor que el de los clastos o matriz, según sea su naturaleza y el proceso genético que los formó. Su existencia en las rocas detríticas es uno de los factores que producen una reducción en su porosidad y, en general, un mayor grado de resistencia mecánica y de cohesión entre sus componentes clásticos y matriz, siempre que la naturaleza del cemento sea adecuada. Por lo tanto, los cementos ejercen una función de *consolidante* natural.

Los cementos más abundantes son calcáreos, silíceos, férricos y arcillosos:

Los cementos *silíceos* están constituidos por cuarzo microcristalino, sílice microcristalina o criptocristalina. Las rocas cementadas por las variedades de sílice suelen presentar características mecánicas que le imprimen alta resistencia a la deformación (son rocas muy duras y resistentes a los procesos de alteración).

Los cementos *calcáreos* suelen estar compuestos por calcita.

Los cementos *férricos* están compuestos por óxidos e hidróxidos de Fe (y algo de Mn). Las variedades mineralógicas mayoritarias presentes son una combinación de hematitas (Fe_2O_3), goetita ($HFeO_2$) y limonita ($Fe(OH)_3$).

4.1.1.3. Rocas arcillosas o lutitas

Son las más abundantes, con un tamaño de grano inferior a 0,06 mm. Estas rocas están compuestas por minerales arcillosos que provienen de la alteración química de los feldespatos. En función del tamaño de grano se distinguen las limolitas, cuando el tamaño de grano es visible al microscopio óptico, y arcillitas, cuando solo es visible por medio de microscopio electrónico.

4.1.2. Rocas químicas o bioquímicas

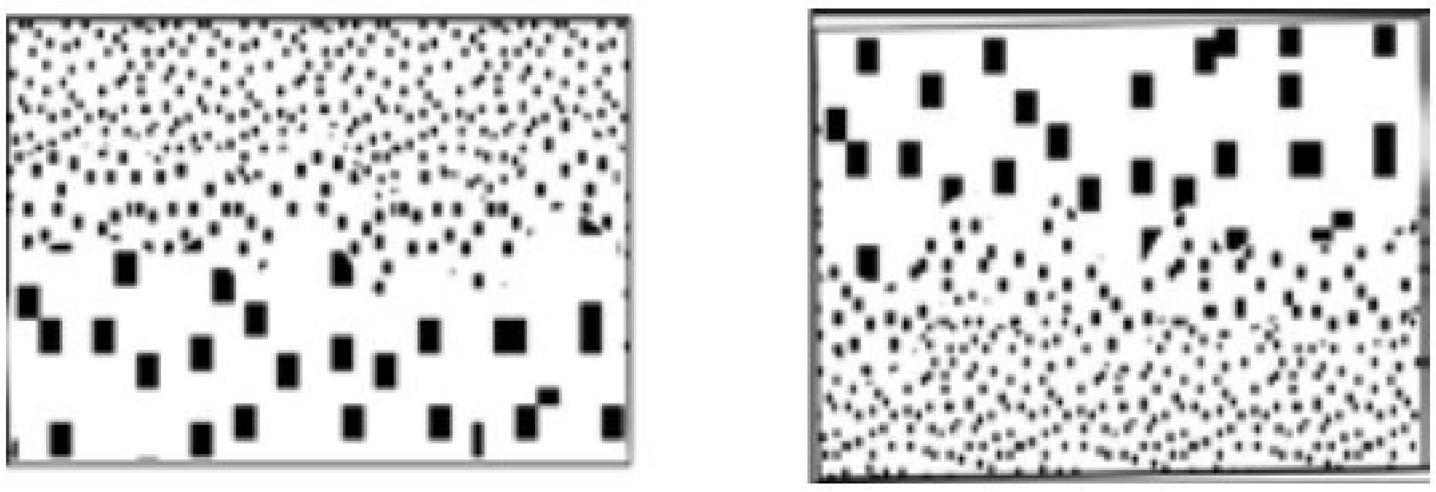
Son el resultado de la precipitación de distintos cationes y aniones disueltos en las aguas de los ríos, lagos y océanos. Las rocas químicas se forman como el resultado de la precipitación de sustancias que se encuentran en disolución con el agua. Las rocas bioquímicas se forman por la intervención directa de organismos vivos (lumaquelas).

Las *calizas* están formadas por carbonato de calcio ($CaCO_3$), principalmente calcita. Las calizas de origen bioquímico se forman por la actividad de plantas o animales que favorecen la precipitación del $CaCO_3$ o por la acumulación de caparazones o partes duras.

Las *dolomitas* son rocas carbonatadas cuyo mineral más abundante es la dolomita o carbonato cálcico-magnésico [$Ca\,Mg\,(CO_3)_2$].

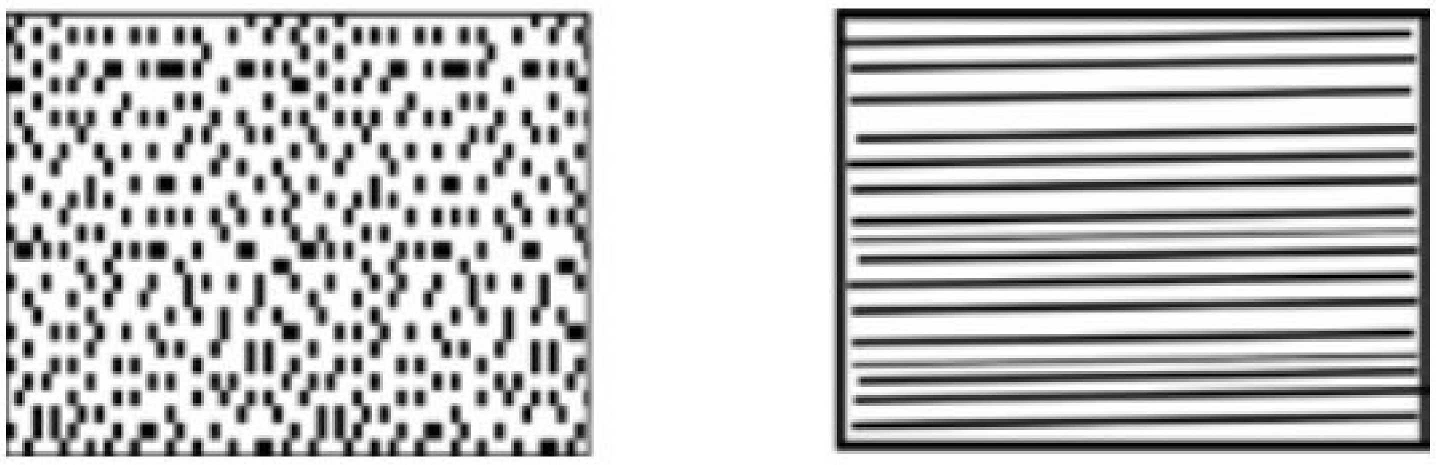
4.2. Estructuras internas en rocas sedimentarias

En las rocas sedimentarias se presentan diferentes estructuras internas: masiva, laminada, granocreciente, granodecreciente.



Estructura granodecreciente

Estructura granocreciente



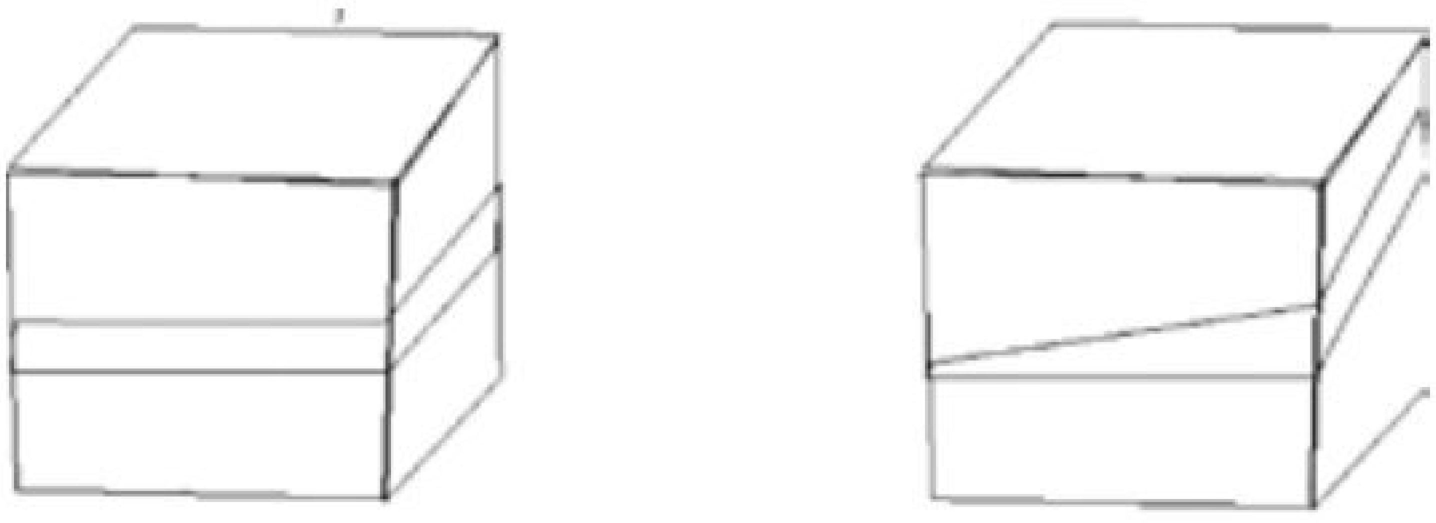
Estructura masiva

Estructura laminada

Figura 32. Estructuras internas de las rocas sedimentarias

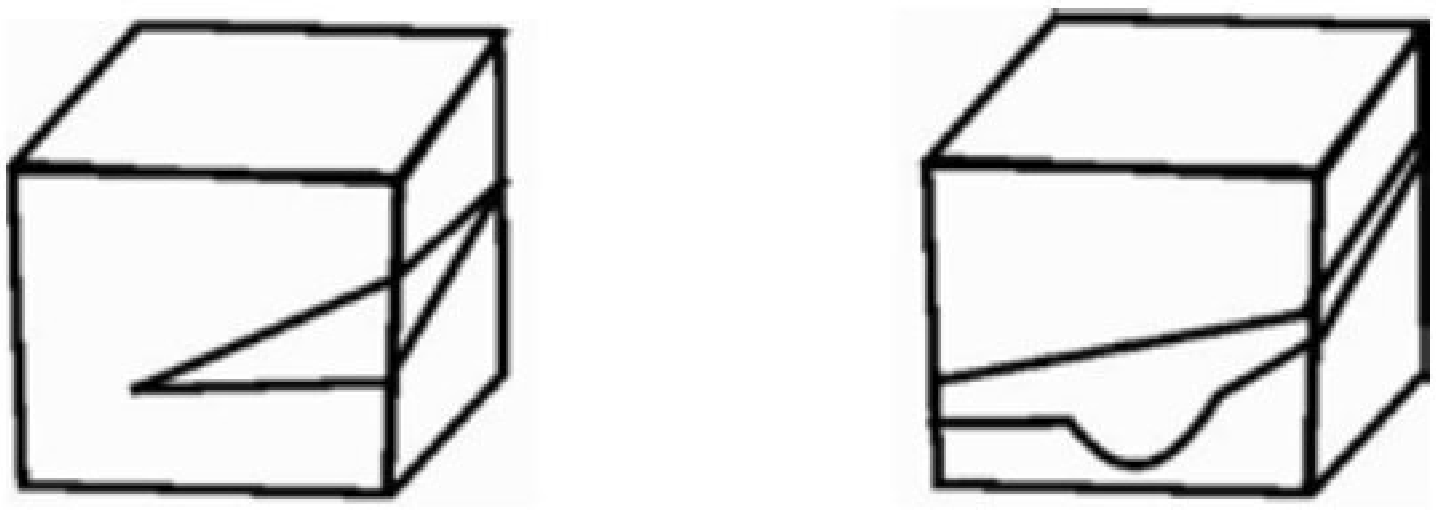
4.3. Estructuras geológicas en rocas sedimentarias

Las estructuras geológicas que presentan las rocas sedimentarias son las siguientes:



Plana horizontal

Plana buzante



Lenticular

Paleocanal

Figura 33. estructuras geológicas de las rocas sedimentarias

4.4. Ejercicios

Conteste brevemente las siguientes preguntas utilizando la bibliografía que sugiere cada una.

1. ¿Cómo clasifica Ernst (1974) las rocas sedimentarias según su textura?
2. Defina arenisca y lutita según Ernst (1974).
3. Defina estratificación y sus variedades según Gilluly (1964).
4. Defina conglomerados según Read y Watson (1975).
5. Defina litificación y sus distintas modalidades según Meléndez-Fúster (1984).

Bibliografía recomendada:

BANDA TARRADELLAS, Enric, Montserrat TORNÉ ESCASANY (2000), *Geología.* Buenos Aires: Ed. Santillana.

ERNST, W. (1974), *Los materiales de la Tierra.* Barcelona: Ed. Omega.

GILLULY, James, Aaron WATERS, Alfred WOODFORD (1964), *Principios de geología.* Bilbao: Ed. Aguilar.

HOLMES, Arthur (1962), *Geología física.* Barcelona: Ed. Omega.

MELÉNDEZ, Bermudo, José FÚSTER (1984), *Geología.* Madrid: Ed. Paraninfo.

ORTIZ, Alejandra (2009), *Glosario de geología e hidrogeología.* Montevideo: Facultad de Agronomía.

PETTIJHON, Francis John (1963), *Rocas sedimentarias.* Buenos Aires: EUDEBA.

READ, H, Janet WATSON (1975), *Introducción a la geología.* Madrid: Ed. Alhambra.

Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas se forman a partir de rocas ígneas y sedimentarias capaces de experimentar transformaciones mineralógicas, estructurales y químicas.

El *metamorfismo* engloba procesos de transformación mineral que ocurren en el interior de la corteza terrestre por variaciones de presión y temperatura. Es de suma importancia diferenciarlo de la **meteorización**, la cual comprende los procesos de desagregación física y química de las rocas de la corteza cuando son sometidas a las condiciones superficiales.

5.1. Tipos de metamorfismo

Existen varios tipos de metamorfismo entre los que se destacan: el dinámico, de contacto y regional.

5.1.1. Metamorfismo dinámico

Aquí la presión es dirigida y, por consiguiente, la deformación predomina sobre la temperatura. Las rocas involucradas están sujetas a varios tipos de molienda mineral y recristalización de algunas especies minerales. Las rocas resultantes de este tipo de metamorfismo se desarrollan siguiendo zonas donde la deformación es máxima. Las rocas resultantes son las milonitas.

5.1.2. Metamorfismo de contacto

Es producido en aureolas alrededor de cuerpos intrusivos en vías de enfriamiento. En estos casos la temperatura es mucho mayor que la presión, permitiendo la recristalización y transformación de las rocas que están próximas al contacto.

5.1.3. Metamorfismo regional

Implica procesos termodinámicos a gran escala que ocurren en un amplio rango de variaciones de presión y temperatura. Tal es así que se producen cambios importantes en las rocas afectadas, los que no son aleatorios sino sistemáticos, definiéndose de esta manera una serie de «grados» y «facies» metamórficas. En esos grados de metamorfismo se «escalonan» las condiciones de temperatura y presión a las que ocurre el proceso de transformación.

Tabla 6. Rocas resultantes según grado de metamorfismo

Roca	Grado de metamorfismo		
	Bajo	Medio	Alto
Pelita	Filita	Micaesquisto	Gneiss
Basalto	Prasinita	Anfibolita	Piroxenita
Caliza	Caliza marmórea	Mármol	Mármol

Una característica común de las rocas metamórficas que ayuda a su reconocimiento es la foliación o esquistosidad. Esta foliación es producto de esfuerzos orientados a los que están sometidos las mismas. Se define la esquistosidad como conjuntos de superficies paralelas, de mayor o menor espaciado, que proporcionan un determinado grado de fisilidad. En función de la esquistosidad se obtienen diferentes texturas metamórficas: muy esquistosa, esquistosa, gnéissica y granoblástica (figura 34).

La fisilidad es la propiedad de una determinada roca de dividirse en láminas delgadas a lo largo de planos subparalelos.

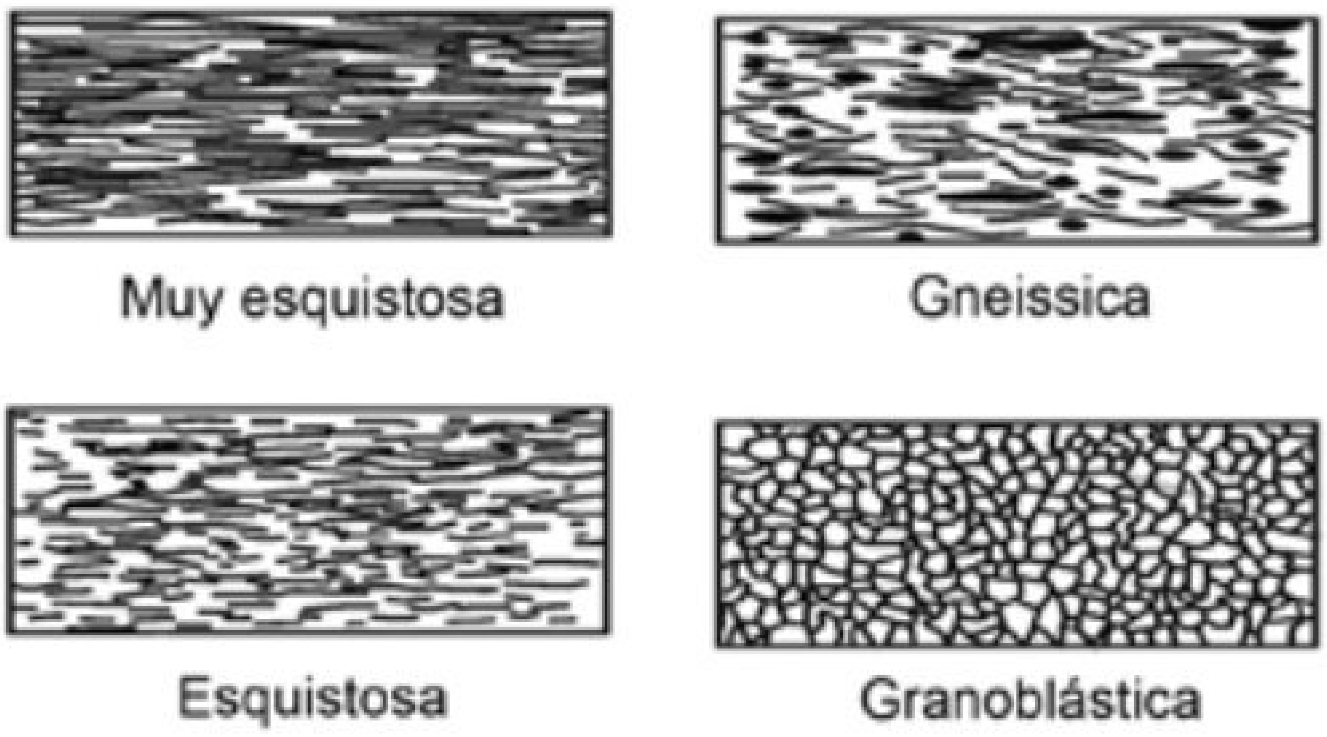


Figura 34. Texturas de las rocas metamórficas

5.2. Rocas metamórficas de importancia agronómica

Algunas de las rocas metamórficas de importancia agronómica son:

Gneiss: rocas más o menos esquistosas, grises, compuestas de capas ricas en feldespatos y cuarzo alternando con capas oscuras ricas en biotita u hornblenda.

Anfibolitas: son rocas pizarrosas de color verde oscuro en cuya composición predomina el anfíbol asociado a cuarzo, feldespato y biotita.

Cuarcitas: rocas granudas de colores claros, compuestas esencialmente de cuarzo.

Filitas: rocas muy esquistosas de colores que varían entre el beige y el negro. Los componentes esenciales son sericita y cuarzo. Pueden contener niveles calcáreos.

Calizas metamórficas: son rocas constituidas por calcita o dolomita, presentan colores variables que van desde el blanco hasta el negro, siendo los más comunes los grises y rosados. La principal característica para su reconocimiento es que reacciona con HCl y se raya fácilmente con cualquier objeto metálico.

Prasinita: roca verde, masiva o muy poco esquistosa, compuesta por actinolita y oligoclasa. La mayoría de los granos no son visibles a ojo desnudo, pero al microscopio se observa que las plagioclasas están totalmente afectadas con crecimiento de microcristales de distintos minerales hojosos.

5.3. Estructuras geológicas de las rocas metamórficas

Las estructuras son muy variadas, pero dominan rocas con plano de esquistosidad subvertical, pliegues y fallas. Hay dos estructuras esenciales: pliegue sinclinal y pliegue anticlinal.

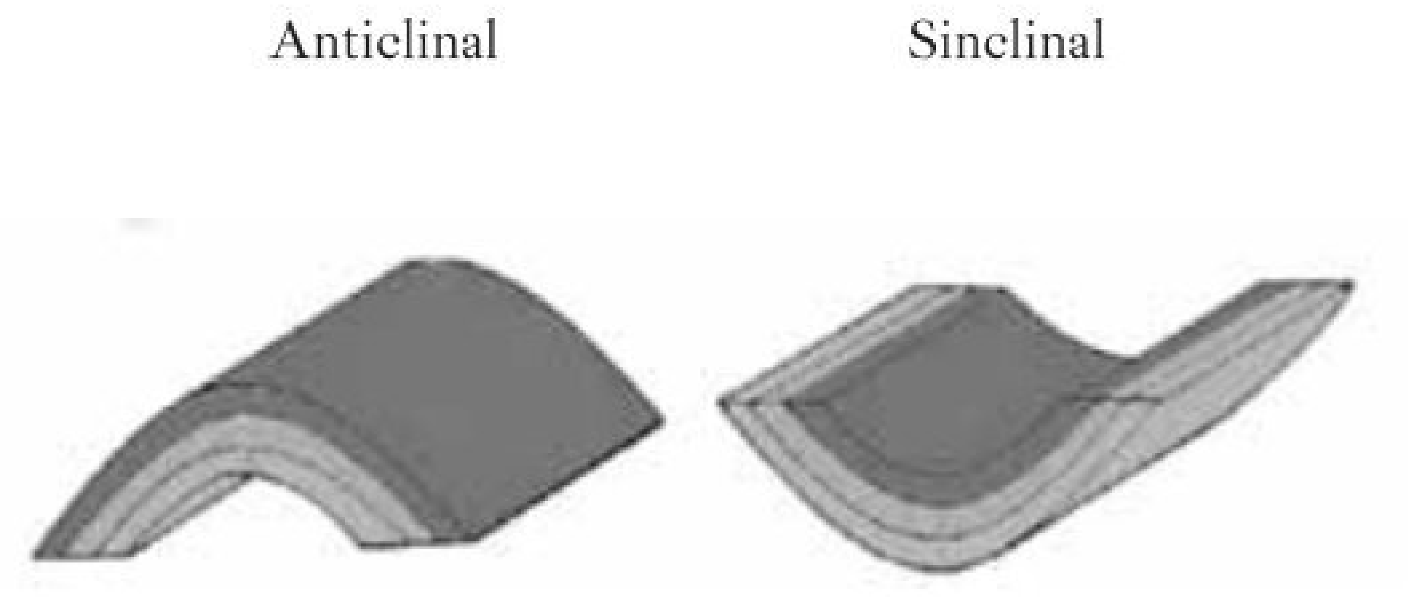


Figura 35. Pliegues en rocas metamórficas

Los pliegues tienen flancos, plano axial y charnela, cada uno de los cuales tiene rumbo y buzamiento.

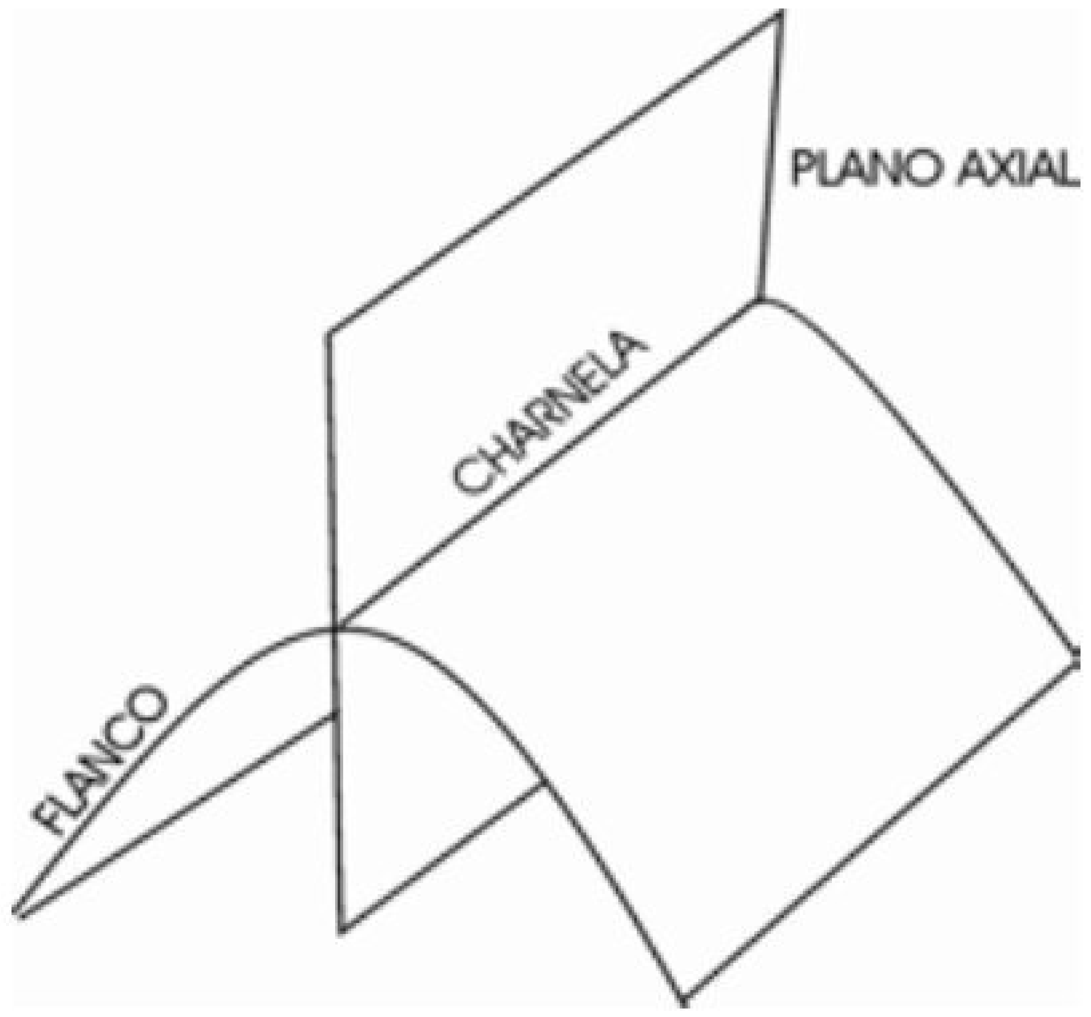


Figura 36. Detalle de un pliegue. N30E 45 E.

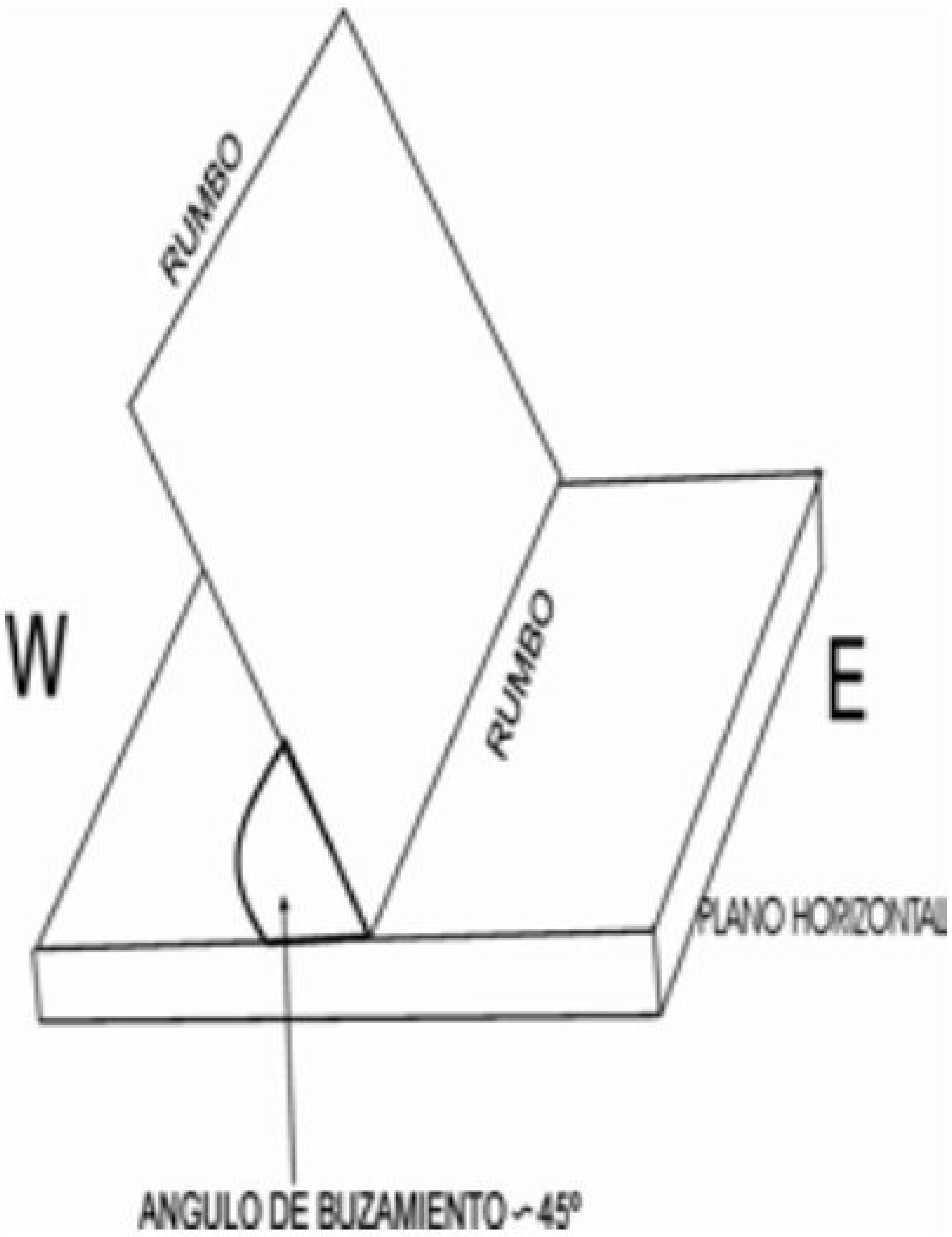

RUMBO
RUMBO
W
E
PLANO HORIZONTAL
ANGULO DE BUZAMIENTO ~ 45º

Figura 37. Rumbo y buzamiento. Radios de curvatura, buzamiento de charnela y cartas resultantes.

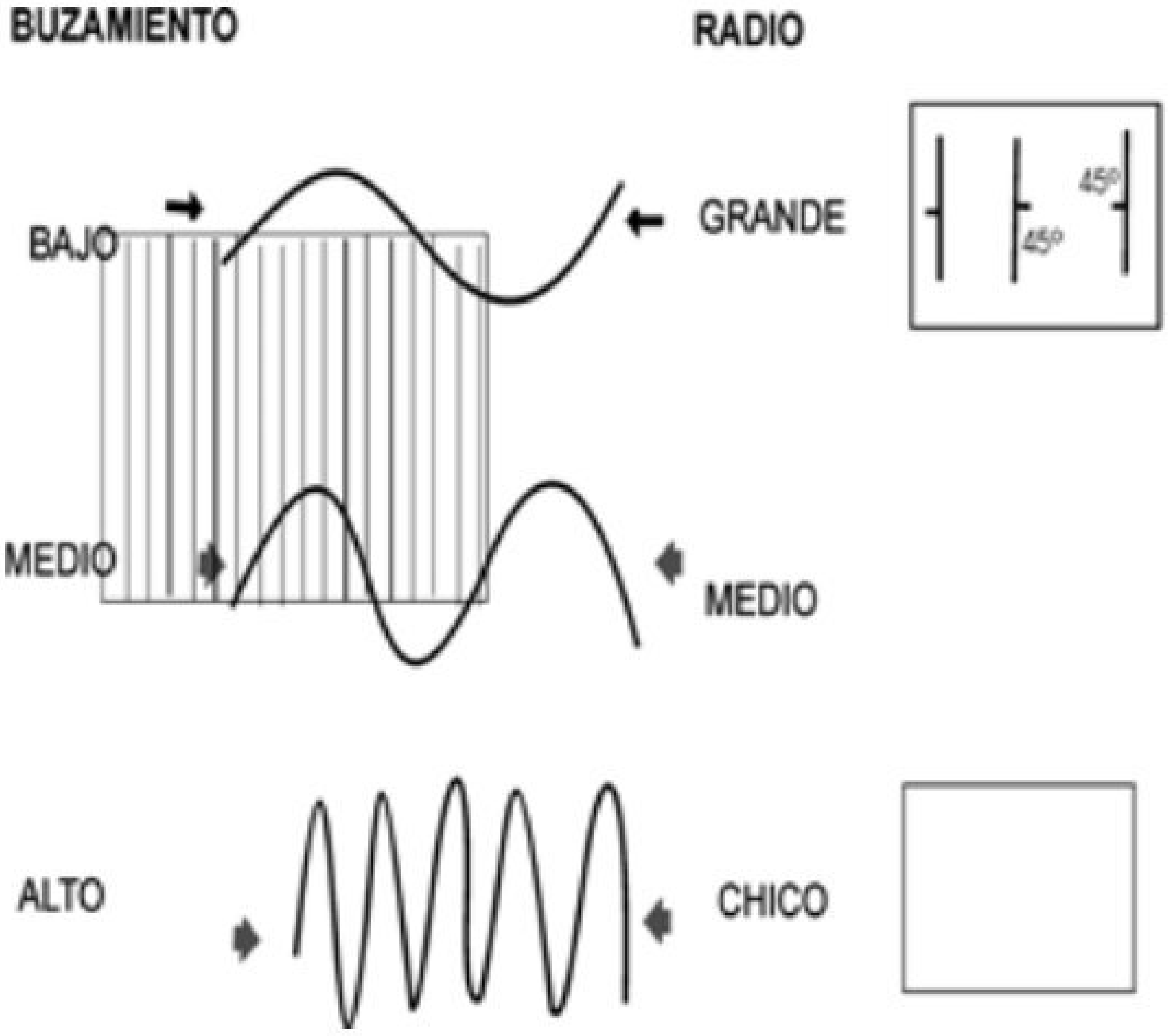
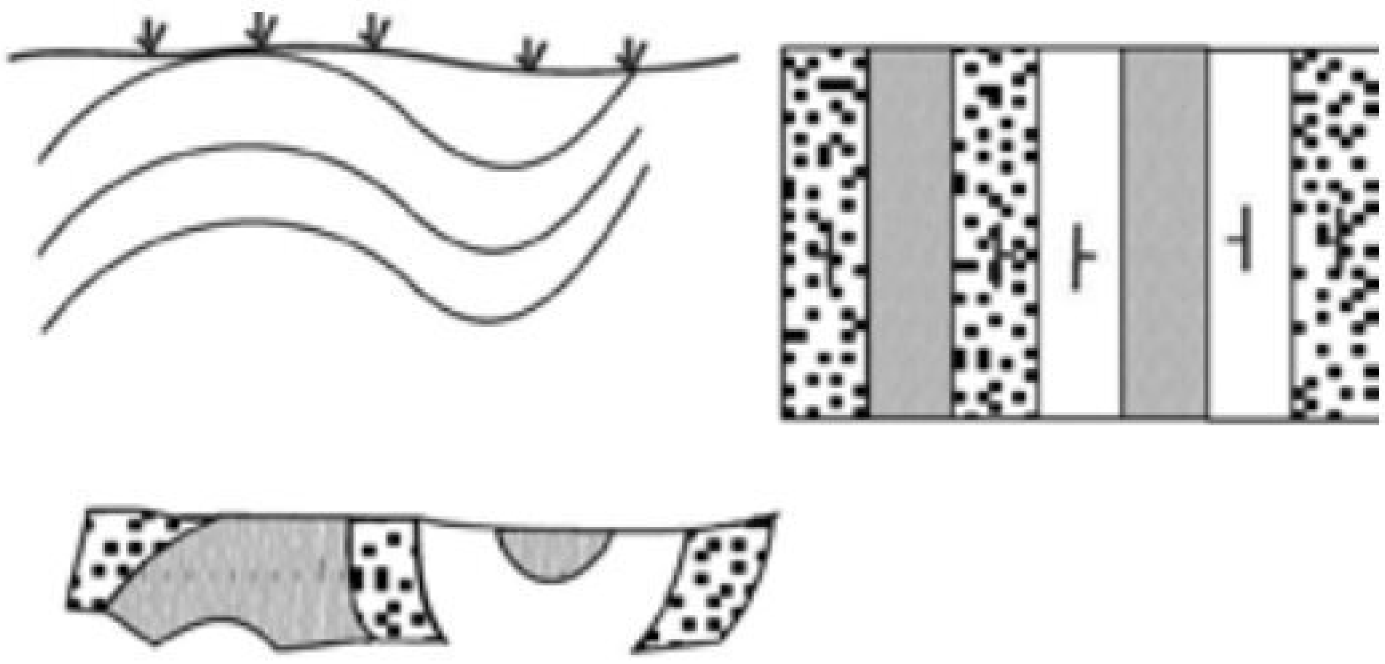
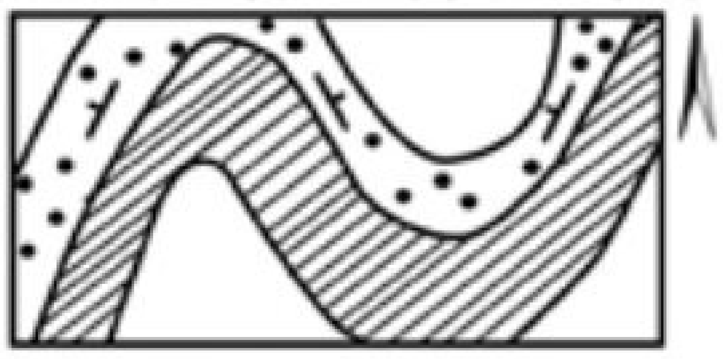

BUZAMIENTO
RADIO
BAJO
GRANDE
45º
45º
MEDIO
MEDIO
ALTO
CHICO

Figura 38. Radio de curvatura



Charnela buzando al Norte



Charnela buzando al Sur

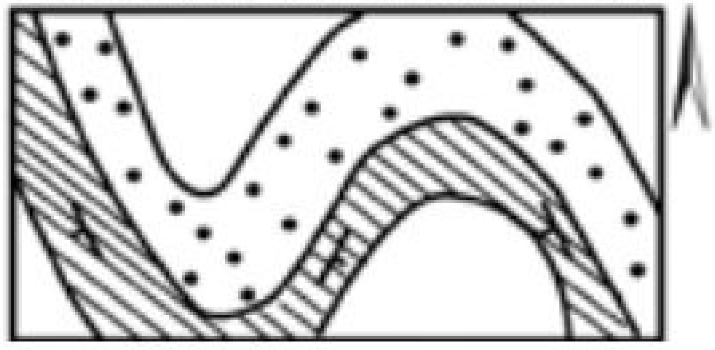


Figura 39. Charnela horizontal, buzando al N y buzando al S

5.4. Ejercicios

Conteste brevemente las siguientes preguntas utilizando la bibliografía que sugiere cada una.

1. Defina gneisses y filitas según Holmes (1962).
2. ¿Cuáles son las clases de metamorfismo citadas por Holmes (1962)?
3. ¿Cómo se distinguen las pegmatitas de las aplitas según Read y Watson (1975)?
4. ¿Cuáles son las texturas metamórficas según Read y Watson (1975)?
5. Defina metamorfismo según Dercourt y Paquet (1978).
6. Defina migmatitas según Dercourt y Paquet (1978).
7. Dibuje a escala natural una muestra de filita y una de gneiss para mostrar la diferencia de textura.

Bibliografía recomendada

BANDA TARRADELLAS, Enric, Montserrat TORNÉ ESCASANY (2000), *Geología*. Buenos Aires: Ed. Santillana.

DERCOURT, Jean, Jacques PAQUET (1978), *Geología*. Barcelona: Ed. Reverté.

ERNST, W. (1974), *Los materiales de la Tierra*. Barcelona: Ed. Omega.

GILLULY, James, Aaron WATERS, Alfred WOODFORD (1964), *Principios de geología*. Bilbao: Ed. Aguilar.

HOLMES, Arthur (1962), *Geología física*. Barcelona: Ed. Omega.

ORTIZ, Alejandra (2009), *Glosario de geología e hidrogeología*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

READ, H, Janet WATSON (1975), *Introducción a la geología*. Madrid: Ed. Alhambra.

CAPÍTULO 6.

Meteorización

La meteorización es el fenómeno de transformación de los minerales y de las rocas que los contienen en el ciclo superficial por intervención de los agentes meteóricos: agua, oxígeno, anhídrido carbónico e hidrogenión. La destrucción de las rocas se realiza en dos procesos mayores denominados desintegración y descomposición. En general se producen simultáneamente pero, dependiendo de las condiciones locales de temperatura, topografía e intensidad de lluvias, puede dominar la acción de uno u otro proceso.

El proceso de *desintegración* es puramente físico y se relaciona con la erosión. Su principal efecto es transformar masas de rocas a un estado de gran división, aumentando la superficie por unidad de volumen, facilitando el acceso de los agentes de descomposición.

El proceso de desintegración se produce principalmente por tres causas:

a. cambios de volumen (contracción-dilatación) por variaciones de temperatura,
b. presiones por congelación de agua en huecos;
c. descompresión por erosión de capas rocosas superiores que favorece diaclasas subhorizontales.

En su conjunto, la meteorización incluye un complejo de acciones físicas y químicas que pueden representarse por la ecuación general de la meteorización

MINERALES PRIMARIOS	+	**AGENTES DE METEORIZACION**	⇌	**RESIDUOS INSOLUBLES**	+	**MINERALES SECUNDARIOS**	+	**IONES**
Cuarzo		Agua		Cuarzo		Arcillas		Ca^{++}
Feldespatos		Oxígeno		muscovita		Gibbsita		Na^{+}
Micas		CO_2				Óxidos		K^{+}
Anfíboles		Hidrogenión				Carbonatos		Mg^{++}
Piroxenos								
Olivina								

La *descomposición* es un proceso químico, incluyendo reacciones de hidrólisis, oxidación, carbonatación, hidratación y fenómenos de solubilización.

El equilibrio se desplaza siempre a la derecha en condiciones superficiales, pero las velocidades de reacción dependen de la concentración iónica. Si los iones producidos no se eliminan del equilibrio por lixiviación, la reacción se enlentece o bloquea.

6.1. Agentes de meteorización

Los principales agentes, como se indica en la ecuación, son: agua, oxígeno, anhídrido carbónico e hidrogenión ($H^+ = H_3O^+$).

6.1.1. Agua

Es el más importante de los agentes de meteorización al punto que, sin agua, no se producen los procesos de descomposición. Actúa como disolvente, agente hidratante y fuente de H^+. Las reacciones entre iones se producen en medio acuoso. Su capacidad de disolvente le permite transportar a los agentes de meteorización y eliminar del medio los cationes resultantes. La acción hidratante se manifiesta en los minerales (o productos) coloidales secundarios y en la solvatación de los cationes resultantes.

La mayoría de los minerales neoformados en superficie contienen agua, ya sea como moléculas de H_2O o como OH^- en extremos de poliedros de coordinación. De acuerdo a la energía de unión con el resto de la estructura cristalina se reconocen cinco tipos de enlace:

1. Agua de absorción, retenida por capilaridad. Se elimina a 100 ° C.
2. Agua de adsorción, en el borde de micelas coloidales rodeando cationes. Se elimina a 110 ° C.
3. Agua de coordinación, también como molécula de H_2O, pero rodeando cationes con carga iónica por su carácter dipolar. Se elimina a más de 110 °C, a 120 °C si rodea K^+ y a 240 °C si rodea Ca^{++}.
4. Agua ceolítica, las moléculas se alojan en canales estructurales y su eliminación es reversible hasta determinada temperatura.
5. Agua de composición, combinada bajo forma de OH^-, la deshidratación es irreversible porque forma parte de la estructura.

6.1.2. Oxígeno

Es otro importante agente de meteorización que afecta intensamente a los iones polivalentes de los cuales el más abundante es Fe^{++}- Fe^{+++}. También afecta a los sulfuros, de los cuales la pirita es la más común (S_2 Fe).

$2\ Fe^{++} + O_2 + 2H_2O + 2H^+ = 2\ Fe^{+++} + 3H_2O = 2\ Fe\ (OH)_3$

En condiciones de pH y Eh bajos el Fe^{++} es estable mientras que, en ambientes oxidantes y alcalinos, el Fe_2O_3 en distintos grados de hidratación es la fase más estable (figura 40).

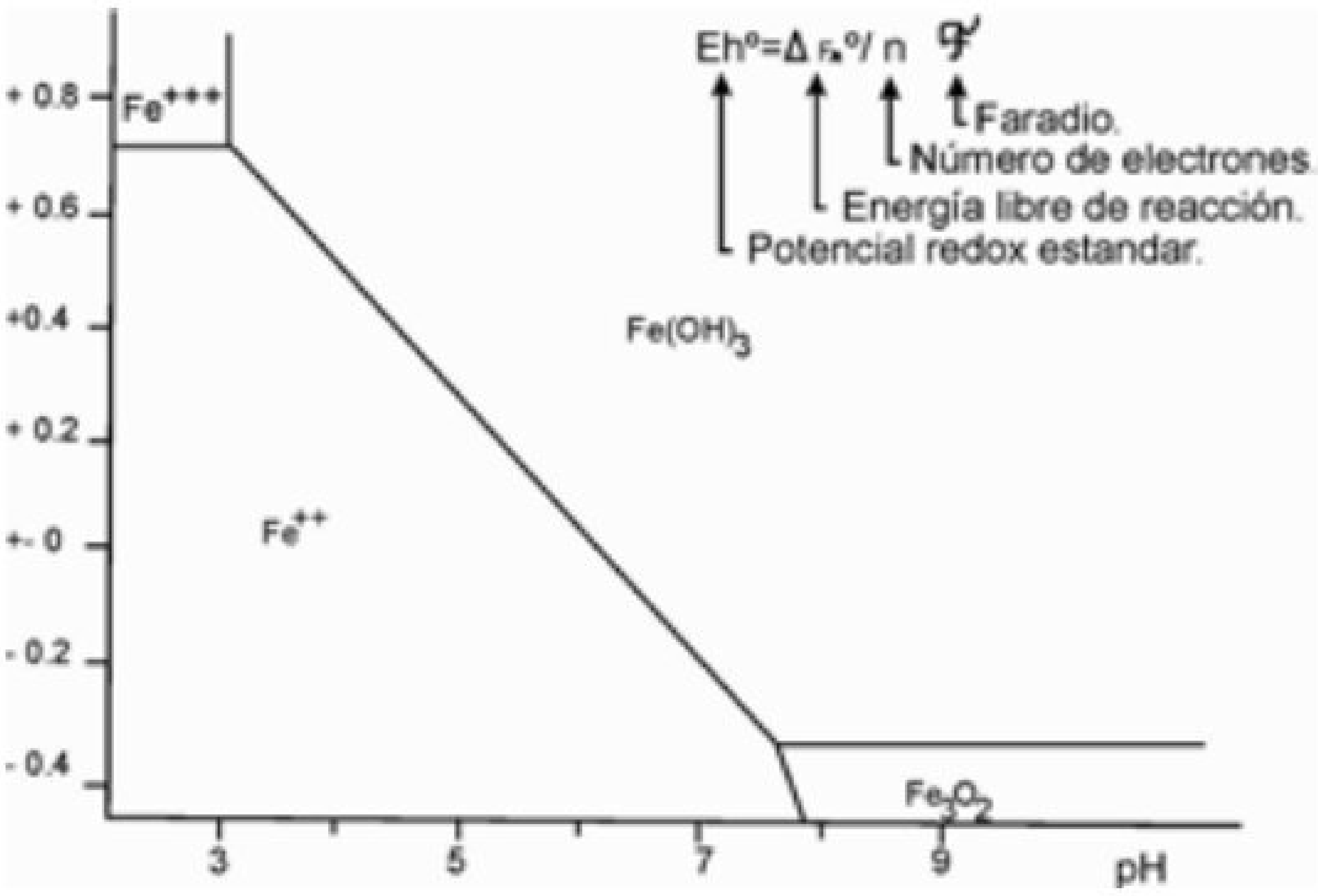


Figura 40. Gráfica de condiciones de Eh y pH para definir campos de estabilidad de los componentes de hierro

6.1.3. Anhídrido Carbónico

Actúa de dos formas en el proceso de meteorización: como agente de carbonatación y como principal fuente del H^+.

$$Ca^{++} + H_2O + CO_2 = CO_3Ca + 2\,H^+$$
$$\rightarrow$$
$$CO_2 + H_2O = CO_3H^- + H^+$$

El CO_2 juega un rol fundamental en el ciclo superficial del Ca^{++} (y del Mg^{++})

$$CO_2 + H_2O \qquad CO_3H^- + H^+$$
$$2CO_3H^- + Ca^{++} \qquad (CO_3H)_2\,Ca$$
$$(CO_3H)_2\,Ca \qquad CO_3Ca + H_2O + CO2$$

Con alta concentración de CO_2 se disuelve el CO_3Ca, por eso no puede precipitar a grandes profundidades oceánicas ya que con baja temperatura y alta presión aumenta la solubilidad del anhídrido carbónico (Ley de Henry).

Cuando el agua normal (pH=7) está saturada de CO_2, tiene pH=5,8, por lo que es un agente generador de H^+ en las aguas meteóricas.

6.1.4. Hidrogenión

En la naturaleza se encuentra solvatado como hidronio (H_3O^+) porque, aunque tiene carga = 1, el radio iónico es casi nulo. Este es el agente más activo de descomposición meteórica a escala iónica.

Ese efecto tan intenso se debe a tres causas fundamentales:

1. Gran poder de penetración, porque el radio iónico del hidronio es prácticamente igual al del oxígeno y luego es fijado en las estructuras como H^+ de tamaño mínimo (figura 41).
2.

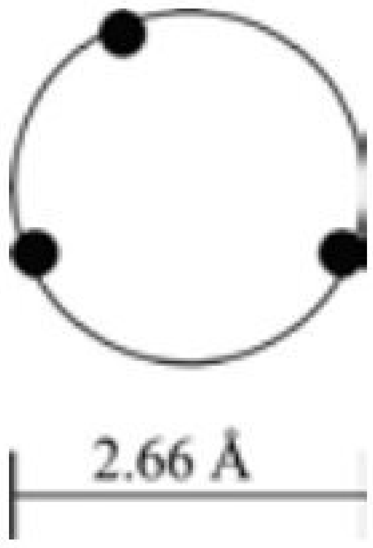


Figura 41. Esquema espacial del ión H_3O^+

3. Alta fee, que lo hace unir al $O^=$ con mayor energía que cualquier otro catión, por lo cual lo desplaza y deja huecos en la estructura (figura 42).

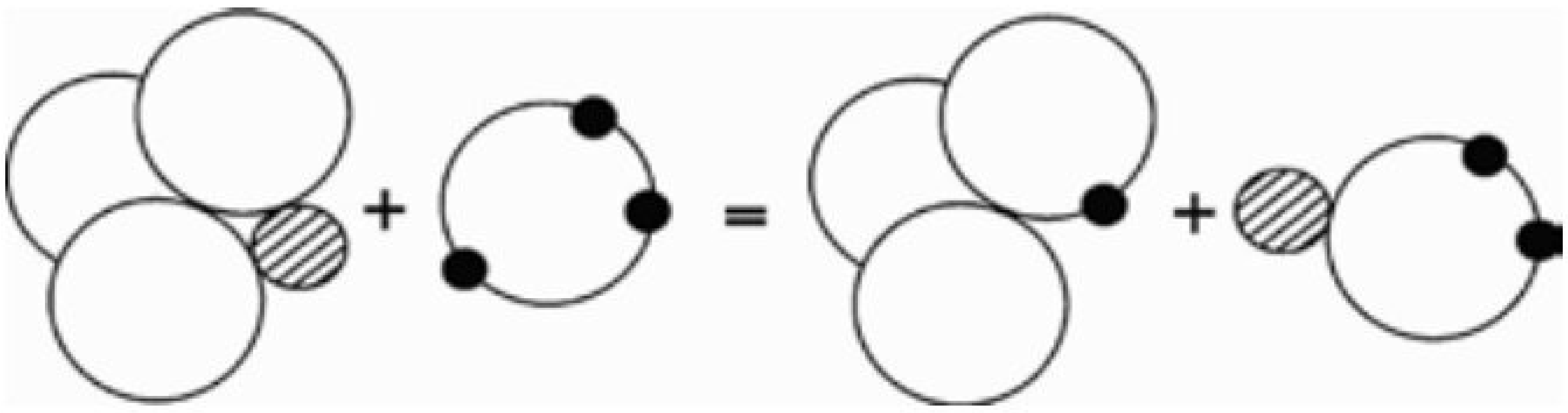


Figura 42. Mecanismo de reemplazo de cationes por H^+ en las estructuras minerales

4. Factor distorsionante, porque cuando queda fijo en la estructura, reemplazando un catión de mayor volumen, los huecos quitan estabilidad a la estructura.

6.2. Alterabilidad de minerales

La mayor o menor facilidad de descomposición de los minerales frente a los agentes de meteorización depende de *factores de capacidad* (intrínsecos) y *factores de intensidad* (externos). Los factores de capacidad son estructurales y químicos; los de intensidad son clima, topografía y drenaje, tal como se muestra en el diagrama siguiente:

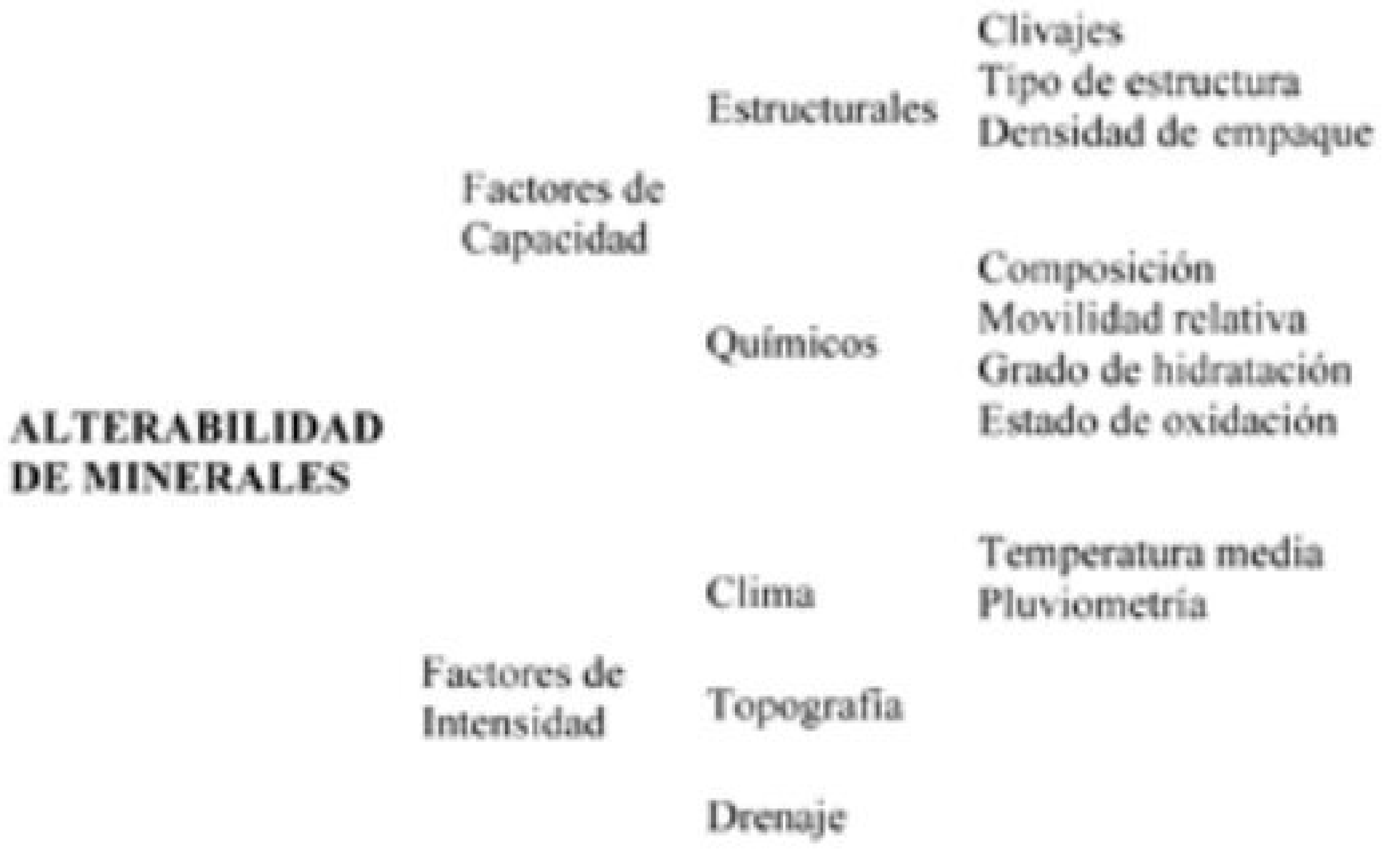

ALTERABILIDAD DE MINERALES
Factores de Capacidad
Estructurales
Clivajes
Tipo de estructura
Densidad de empaque
Químicos
Composición
Movilidad relativa
Grado de hidratación
Estado de oxidación
Factores de Intensidad
Clima
Temperatura media
Pluviometría
Topografía
Drenaje

Diagrama 3. Esquema de alterabilidad de los minerales

Los factores de capacidad determinan la mayor o menor resistencia a la meteorización que presentan los diferentes minerales ante iguales condiciones ambientales.

Los factores de intensidad determinan la velocidad de descomposición, así como la naturaleza de los minerales secundarios a formarse. Por ese motivo es necesario analizar en detalle cada uno de los factores de modo que, el nivel de conocimiento que se alcance, permita deducir las condiciones que reinaron para llegar a determinada observación naturalista actual y las transformaciones que pueden esperarse a partir de determinada situación observable en el presente.

6.2.1. Factores de capacidad

De los factores *estructurales* el más importante es el tipo de estructura, siendo los tectosilicatos los más resistentes y los nesosilicatos los más frágiles. Los tectosilicatos tienen uniones de gran f.e.e en todo el desarrollo de cada cristal.

A medida que el porcentaje de uniones tetraédricas con cationes de gran carga y pequeño volumen va disminuyendo, el mineral se vuelve más vulnerable a los agentes atmosféricos.

El cuadro siguiente refleja bien los valores de sumatoria de fuerza electrostática de enlace (Σ f.e.e) para minerales sin OH^- y sin Fe^{++}. Cuando ambos iones aparecen el comportamiento no se puede expresar simplemente por la Σ f.e.e. El Fe^{++} se oxida rápidamente y el H^+ es un catión de valencia + y número de coordinación 1.

Tabla 7. Valores de Σ f.e.e de los principales minerales formadores de rocas

Tipo	**Familia**	**Fórmula básica**	**Σ f.e.e**
Tectosilicatos	Cuarzo	$Si_{12}O_{24}$	12
	Albita	$Si_9Al_3O_{24}Na_3$	11,60
	Anortita	$Si_6Al_6O_{24}Ca_3$	11,25
Filosilicatos	Biotita	$Si_6Al_2O_{24}H_4Fe_6K_2$	
	Muscovita	$Si_6Al_2O_{24}H_4Al_3K_2$	
Inosilicatos	Anfíboles	$Si_7AlO_{24}H_2Fe_7K$	10,88
	Piroxenos	$Si_8O_{24}Fe_8$	10,66
Nesosilicatos	Peridotos	$Si_6O_{24}Fe_{12}$	10

Los factores *químicos* son, en cambio, todos muy importantes.

A igualdad de tipo estructural los cationes que ocupen el centro de los poliedros inciden en la estabilidad porque presentan diferentes f.e.e. Las plagioclasas sirven como ejemplo más notable.

Para este caso no se llevarán a 24 oxígenos, ya que la estructura es más simple y pueden presentarse los valores ilustrativos con solo 8 oxígenos como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Diferente Σ f.e.e según mineral

Mineral	Fórmua	Σ fee
Anortita (An 100)	$Si_2\ Al_2\ O_8\ Ca$	3,75
Bytownita (An 80)	$Si_{2,2}\ Al_{1,8}\ O_8\ Ca_{0,8}\ Na_{0,2}$	3,78
Labrador (An 50)	$Si_{2,4}\ Al_{1,6}\ O_8\ Ca_{0,6}\ Na_{0,4}$	3,80
Andesina (An 30)	$Si_{2,6}\ Al_{1,4}\ O_8\ Ca_{0,4}\ Na_{0,6}$	3,83
Oligoclasa (An 10)	$Si_{2,8}\ Al_{1,2}\ O_8\ Ca_{0,2}\ Na_{0,8}$	3,86
Albita (An 0-5)	$Si_3\ Al\ O_8\ Na$	3,88

La *movilidad relativa* de los cationes se refiere a la mayor o menor facilidad con que un catión puede abandonar la estructura cristalina. Ello no depende solo de su f.e.e ni de su potencial iónico. Ha sido medida experimentalmente por decenas de investigadores y, en lo esencial, se ha llegado a este orden: Na^+, Ca^{++}, Mg^{++}, K^+, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3.

Aquí se puede observar que, siendo el K^+ el catión más voluminoso y de menor carga, es menos móvil que otros, debido a que su gran tamaño dificulta la salida de la estructura en que se encuentra.

El índice potencial de meteorización (IPM) de Reiche (1954) se mantiene todavía en vigencia:

$$\text{IPM} = \frac{\text{Moles } K_2O + Na_2O + MgO + CaO - H_2O}{\text{Moles } SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO + MgO}$$

Cuanto mayor es este índice el mineral es más meteorizable frente a igualdad de condiciones externas. Como el H^+ es un poderoso agente de descomposición en los procesos superficiales, la existencia de OH^- en la estructura de un mineral le aumenta la estabilidad y por ello se resta en el numerador las moles de H_2O.

La serie de Goldich establece empíricamente la estabilidad relativa de los minerales.

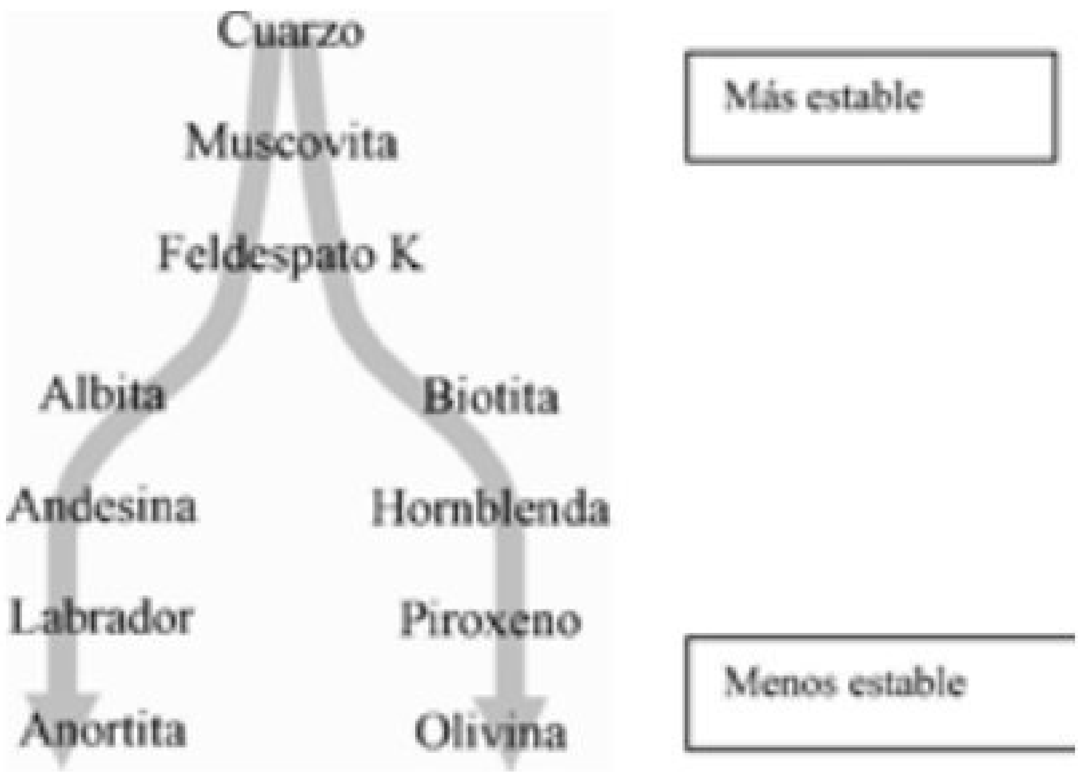


Figura 43. Serie de Goldich

El *estado de oxidación* se refiere solo al hierro Fe^{++}- Fe^{+++} entre los elementos mayores, y tiene gran incidencia en las familias de minerales ferromagnesianos.

La presencia de Fe^{++} en una estructura reduce su estabilidad potencial, dado que al pasar de Fe^{++} a Fe^{+++} debe abandonar el enrejado cristalino para que se mantenga la neutralidad eléctrica (figura 44).

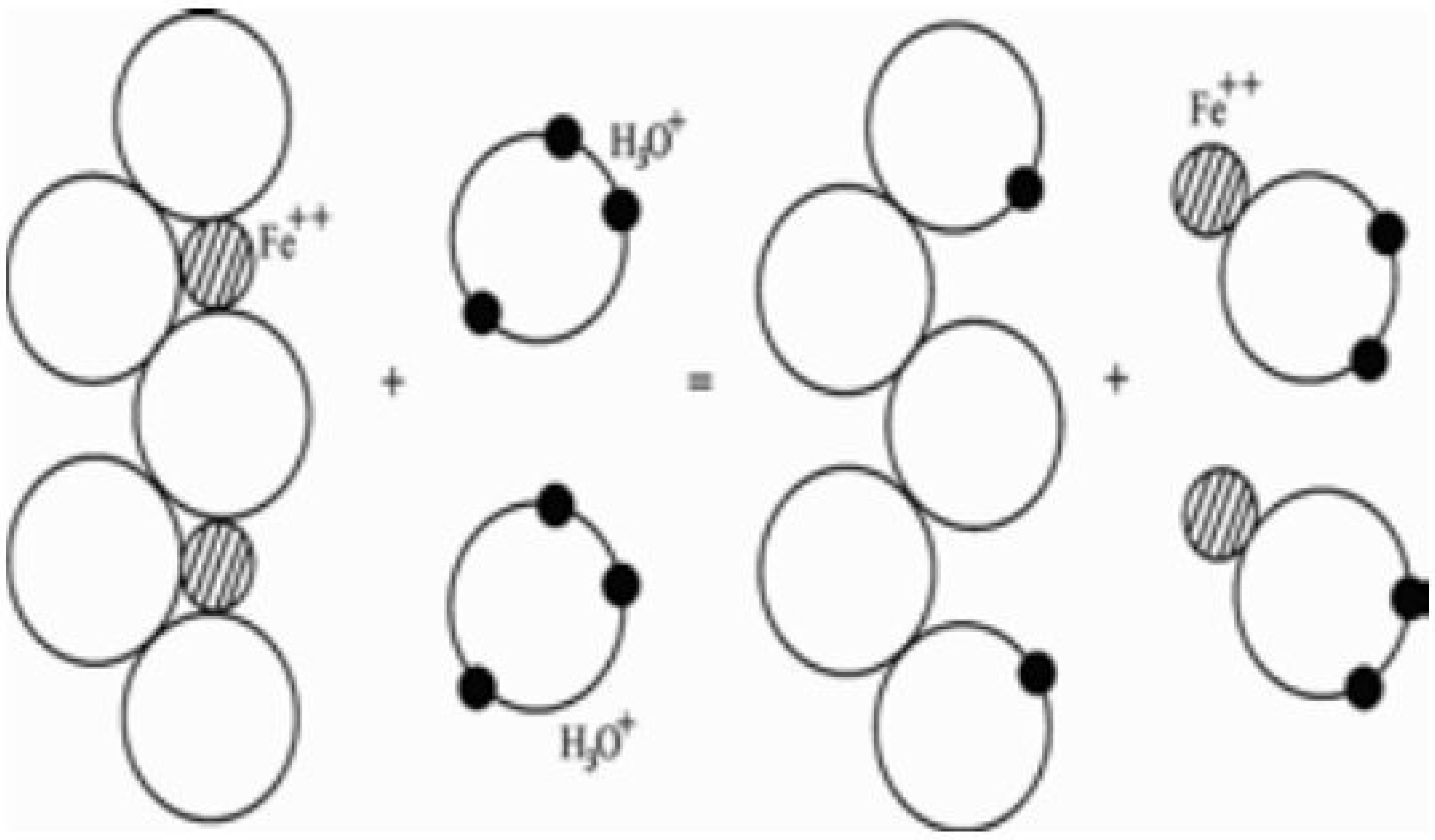


Figura 44. Ejemplo de reemplazo de Fe^{++} por H$^+$

$$2\ Fe^{++} + O_2 + H_2O = 2\ Fe\,(OH)_3$$

Al formarse Fe $(OH)_3$ el Fe^{+++} sale del equilibrio y permite que más Fe^{++} abandone la estructura primaria.

Este factor es muy importante porque hace que los ferromagnesianos con Fe^{++} sean menos estables que los Mg^{++} en cada serie isomorfa de cada familia. Determina además que la muscovita con Al^{+++} octaédrico sea muy estable y que la biotita, con Fe^{++} y Mg^{++} en la capa octaédrica, sea fácilmente meteorizable, aunque ambas tengan la misma f.e.e.

El **grado de hidratación** ya fue parcialmente comentado al tratar la movilidad de los cationes. Cada H$^+$ constituyente de la estructura genera lugares inatacables por el H_3O^+ de las aguas meteóricas y, como corolario, genera mayor estabilidad. De los minerales primarios el ejemplo más notorio es el comportamiento de anfíboles y piroxenos, pero también aquí debe señalarse que la mayoría de los minerales generados en el ciclo superficial contienen OH$^-$ estructural y las otras formas de hidratación antes referidas.

6.2.2. Factores de intensidad

Estos factores determinan el grado de alteración y los productos resultantes. Ello es debido a que definen la cantidad y tiempo de contacto de los agentes de meteorización: abundancia de agua, temperatura reinante, pendiente del terreno, etc. De hecho, estos factores determinan que sean los procesos de descomposición o de desintegración los que dominan en la meteorización.

La descomposición química domina en zonas bajas, con clima cálido y húmedo. La desintegración domina en zonas altas, de topografía quebrada, clima frío y seco.

La ecuación fundamental de la meteorización es reversible, por lo tanto se desplaza hacia la derecha con aumento de temperatura y abundancia de agentes de meteorización, favoreciendo la liberación de iones y la formación de minerales secundarios.

Son tres los factores de intensidad fundamentales: clima, topografía y drenaje.

6.2.2.1. Clima

La acción del clima es compleja por la intervención de muchas variables. A modo de ejemplo: en Uruguay y el nordeste de Brasil se generan precipitaciones de 1200 mm/año. Sin embargo, en Uruguay se estiman lluvias de 100 mm/mes, mientras que en Pernambuco los 1200 mm llueven en noviembre. En Uruguay el clima es templado y húmedo, con gran desarrollo de suelos, mientras que en el nordeste de Brasil es semiárido a árido.

Los intentos por cuantificar la acción del clima han sido numerosos, pero los trabajos de Pedro (1968-71), reuniendo datos naturalistas y experiencias de laboratorio, son los que han dado explicaciones satisfactorias. Este autor propone reconocer cuatro tipos fundamentales de procesos de meteorización: *podzolización*, *bisialitización*, *monosialitización* y *alitización*.

La *podzolización* se produce en condiciones de aridez en las cuales el Al^{+++} puede ser eliminado en las aguas de drenaje. Las aguas deben contener ácidos orgánicos para que formen complejos (quelatos). El Si^{++++} también puede ser eliminado, pero en proporción mucho menor: $q\ (Al_2O_3) > q\ (SiO_2)$.

La *bisialitización* se produce en condiciones de climas templados con lixiviación de SiO_2 poco importante como para que se puedan formar minerales arcillosos de tipo 2:1 (esmectitas o illitas). Se retienen también cationes móviles (Na^+, Ca^{++}, K^+).

La *monosialitización* ocurre cuando la lixiviación de SiO_2 es más importante y, en consecuencia, la $[SiO_4H_4]$ es más débil, conduciendo a la formación de minerales arcillosos de tipo 1:1 del grupo de la caolinita. La lixiviación de cationes móviles es muy intensa.

La *alitización* se produce en condiciones extremas de temperatura y humedad (clima tropical). La lixiviación es muy intensa, la $[(SiO_4H_4)]$ es mínima y se forman óxidos de aluminio o hierro hidratados: lateritas y bauxitas.

En la figura 45 se muestra un mapamundi con la distribución global de los distintos tipos de procesos de meteorización arriba descritos. Es interesante observar que Uruguay se encuentra en el límite entre la estabilidad de los esmectitas (bisialitización) y la estabilidad de la caolinita (monosialitización).

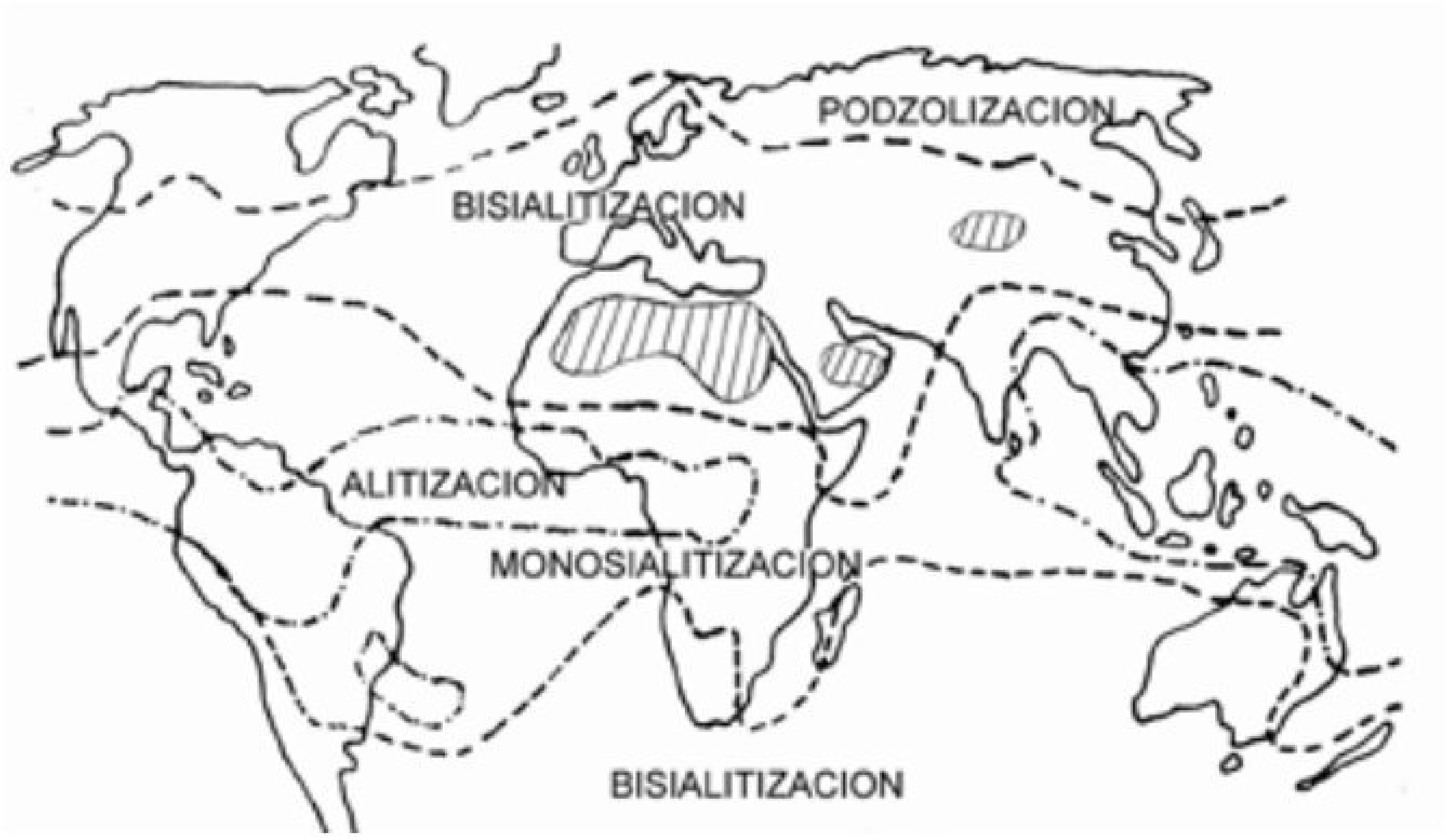


Figura 45. Distribución global de los distintos tipos de procesos de meteorización, según Pedro (1968)

El clima regula en buena medida la dinámica de la SiO_2 pues, al aumentar las lluvias se elimina más fácilmente y, con mayor temperatura, se libera más rápido de las estructuras internas de los minerales primarios.

6.2.2.2. Topografía

Se debe considerar a escala regional y local. A escala regional las áreas montañosas dificultan los procesos de descomposición. A escala local la topografía controla la velocidad de escorrentía, infiltración y erosión.

El punto fundamental es que las áreas en levantamiento isostático tienen predominio de erosión/descomposición.

6.2.2.3 Drenaje

Este factor es el más importante de los externos en la descomposición de los minerales y rocas, pero es un parámetro difícil de cuantificar. El drenaje elimina el agua arrastrando coloides e iones liberados de la reacción de meteorización.

Turc (1965) propone la ecuación siguiente donde:

$$D = P - \frac{P}{0{,}9 + P^2/L^2}$$

D = drenaje = 42% para Uruguay
P = precipitación anual en mm
L = 300 +25 t + 0,05 t^3 en mm
t = temperatura media anual en °C

Tardy (1969) usa la relación Na^+/K^+ en las aguas por haber demostrado en varias decenas de cuencas que, cuando $Na^+/K^+ < 10$, las condiciones de drenaje son muy buenas y llegan a 20 en medios confinados.

Esta conclusión le permitió encarar la definición de campos estables de feldespatos y minerales arcillosos en los procesos de transformación durante los fenómenos meteóricos.

Las fórmulas de los principales minerales arcillosos resultantes de los procesos de meteorización son las siguientes:

MONTMORILLONITA	$Si_8O_{20}(Al_{3.33}Mg_{0.66})(OH)_4Na_{0.66}$
ILLITA	$(Si_3Al)O_{10}Al_2(OH)_2K <> [Si_6A_2]O_{20}A_{40}(OH)_4K_2$
CAOLINITA	$Si_2O_5Al_2(OH)_4 <> Si_8O_{20}Al_8(OH)_{16}$
GIBBSITA	$Al(OH)_3$

6.3. Minerales secundarios

En la ecuación fundamental de la meteorización se forman diversos minerales secundarios entre los que, los minerales arcillosos, los óxidos de hierro y los carbonatos son los más importantes en condiciones climáticas intermedias. La formación de estos minerales implica una destrucción parcial o total de los minerales primarios y una recomposición de estructuras de acuerdo a las condiciones del ambiente en que se produce la meteorización.

Para la formación de *minerales arcillosos* es necesario la descomposición de silicatos y la liberación de los tetraedros Si-O para luego recombinarse en función de las condiciones físico-químicas del medio y los tipos de cationes presentes en el equilibrio.

Para la formación de *óxidos de hierro* debe liberarse el Fe^{++} de los minerales ferromagnesianos y darse condiciones de pH y Eh tales que coincidan en el área de estabilidad de los óxidos hidratados $Fe(OH)_3$, como fue visto en la figura 40.

La formación de *carbonatos* se produce por acción del CO_2 sobre iones tales como Ca^{++} o Mg^{++} cuando las condiciones de pH lo permitan.

$CO_2 + Ca^{++} + H_2O \leftrightarrow CO_3Ca + 2H^+$

Esta ecuación muestra que, cuando la concentración de H^+ es elevada, el equilibrio se desplaza hacia la izquierda y el Ca^{++} se mantiene en solución.

Aquí se consideran los minerales de interés agronómico en clima templado: minerales arcillosos, carbonatos, óxidos de hierro.

6.3.1. Minerales Arcillosos

El proceso general de meteorización puede considerarse integrado por: una fase destructiva, en la que los agentes de meteorización transforman parte de los minerales primarios en coloides e iones, y una segunda fase de neogénesis o neoformación. En esta etapa esos productos se combinan, conduciendo a la formación de minerales secundarios, como fue planteado en la ecuación fundamental de la meteorización.

Los minerales secundarios más importantes son los *minerales arcillosos* —principales componentes de las arcillas y de los suelos de clima templado—. Son filosilicatos sílico-aluminosos, hidratados, de muy pequeño tamaño de grano y que, en fase acuosa, poseen la propiedad de intercambiar cationes con el medio.

Es necesario evitar confusiones terminológicas y, para ello, se debe diferenciar entre:

- *Fracción arcilla:* intervalo granulométrico constituido por partículas menores a dos micras (0,002 mm) de diámetro.
- *Arcilla:* material natural de grano muy fino que se vuelve plástico y pegajoso al humedecerse y con cierto poder de hinchamiento cuando se moja.
- *Minerales arcillosos:* principales componentes de las arcillas, filosilicatos citados en el capítulo de minerales.

La estructura de los minerales arcillosos se basa en la interrelación de capas de tetraedros y octaedros con variaciones de cationes centrales y forma de asociación que determinan diferentes familias y especies.

Las capas de tetraedros tienen cationes de radio muy pequeño en su hueco central: Si^{+4} (0,4Å), Al^{+++} (0,57 Å). Las capas de octaedros contienen cationes medianos:

Al^{+++} (0,57 Å) illita y beidellita; con Mg^{++} en montmorillonita.
Mg^{++} (0,78 Å) saponita.
Fe^{+++} (0,67 Å) nontronita, glauconia.
Fe^{++} (0,83 Å) nontronita, glauconia.

Según la disposición o yuxtaposición de las capas octaédricas y tetraédricas se distinguen tres tipos estructurales:

1:1 caolinitas, 2:1 illitas y esmectitas, 2-1-1 cloritas.

Las estructuras 1:1 constan de capas compuestas, formadas por la yuxtaposición de una capa tetraédrica y una capa octraédrica, según se muestra en la figura 46.

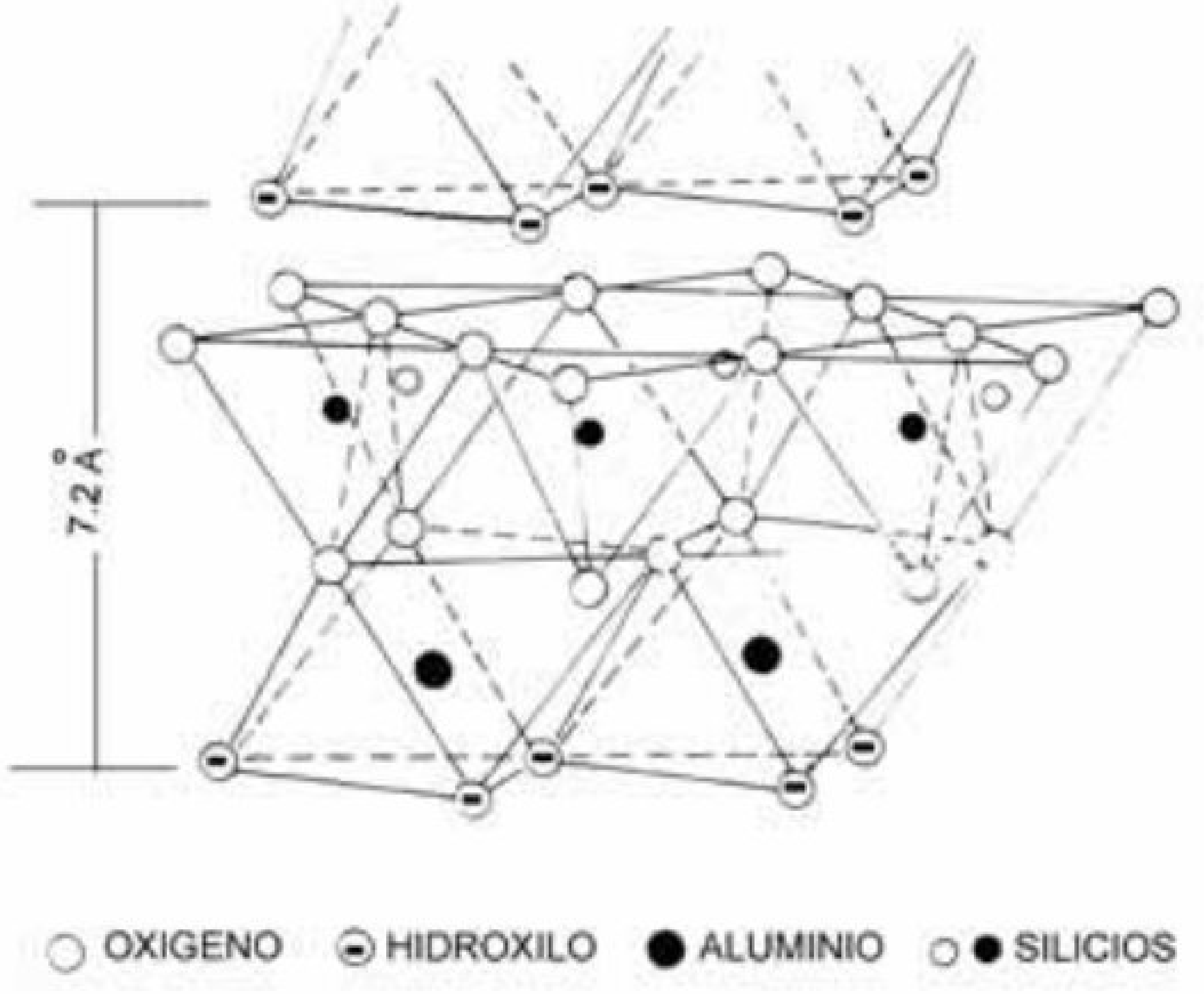


Figura 46. Estructura interna de la caolinita

Las estructuras tipo 2:1 constan de capas unitarias compuestas por la yuxtaposición de una capa octraédrica entre dos capas de tetraedros con sus vértices hacia el centro. A este tipo pertenecen las illitas y las esmectitas.

En las figuras 47 y 48 se muestran las estructuras en forma esquemática, pero existen muchas posibilidades de variación en cuanto a la composición de los cationes del centro de los poliedros de O-OH que generan minerales de comportamiento muy diferente.

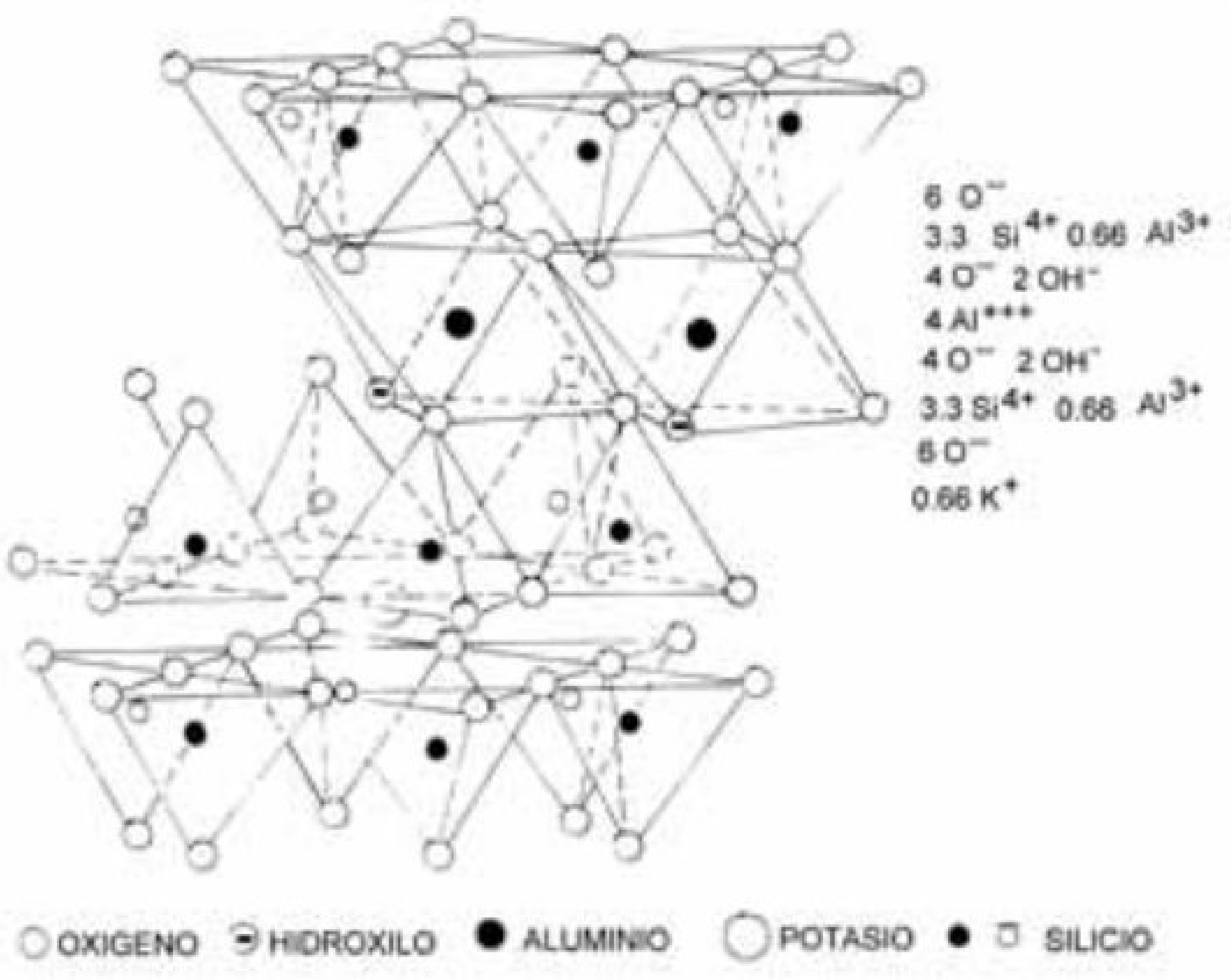

6 O⁼
3.3 Si4+ 0.66 Al3+
4 O⁼ 2 OH⁻
4 Al+++
4 O⁼ 2 OH⁻
3.3 Si4+ 0.66 Al3+
6 O⁼
0.66 K+
OXIGENO
HIDROXILO
ALUMINIO
POTASIO
SILICIO

Figura 47. Estructura interna de la illita

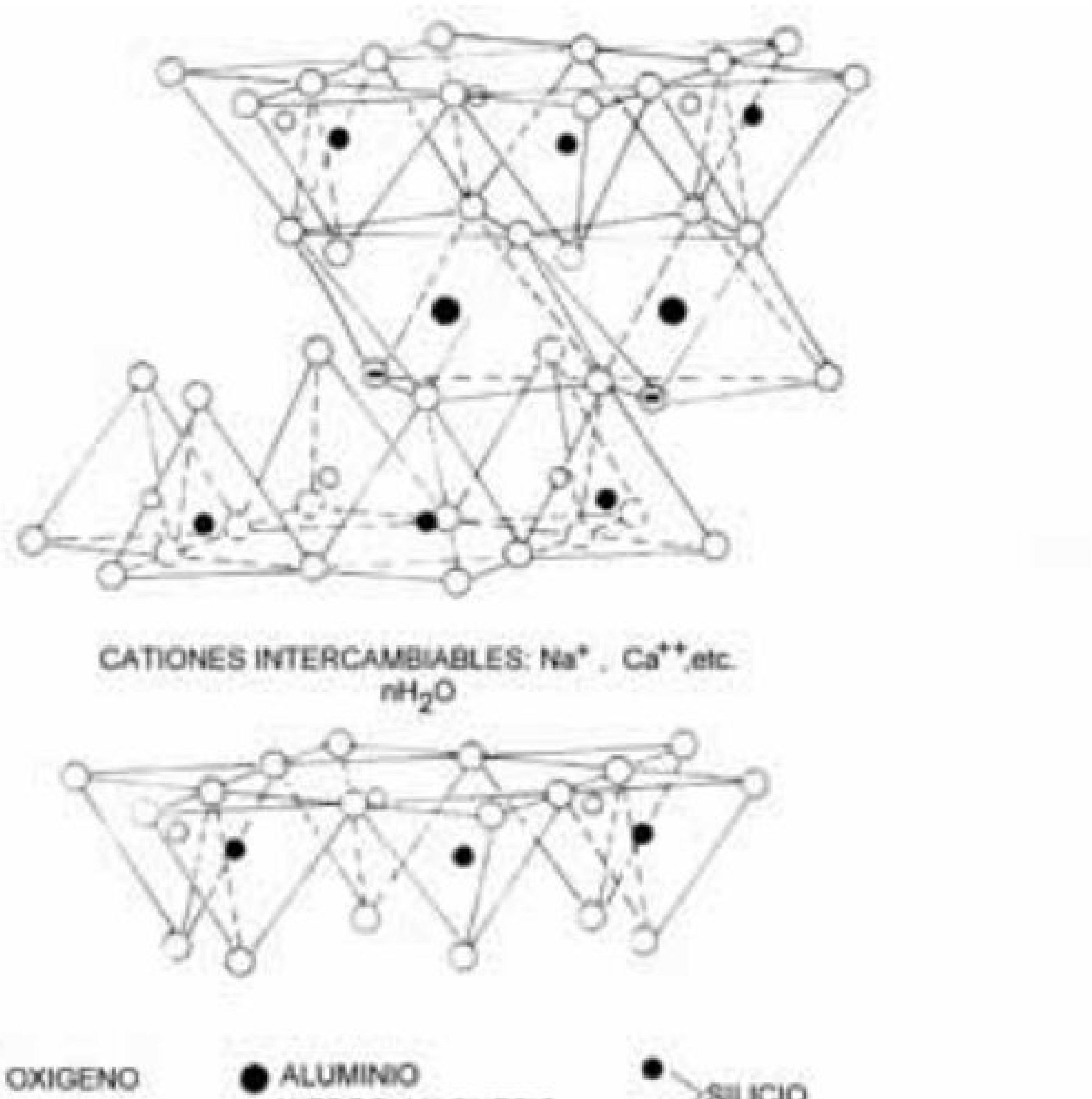

CATIONES INTERCAMBIABLES: Na+, Ca++, etc.
nH2O
OXIGENO
HIDROXILO
ALUMINIO
HIERRO, MAGNESIO
SILICIO
excepcionalmente aluminio

Figura 48. Estructura interna de la montmorillonita

El tipo estructural 2-1-1 comprende a las cloritas y se caracteriza por contener entre láminas compuestas de tipo 2:1, como las vistas arriba, capas de Al-OH o Mg-OH en coordinación octaédrica. En la figura 49 se expone un ejemplo esquemático de este tipo de estructura.

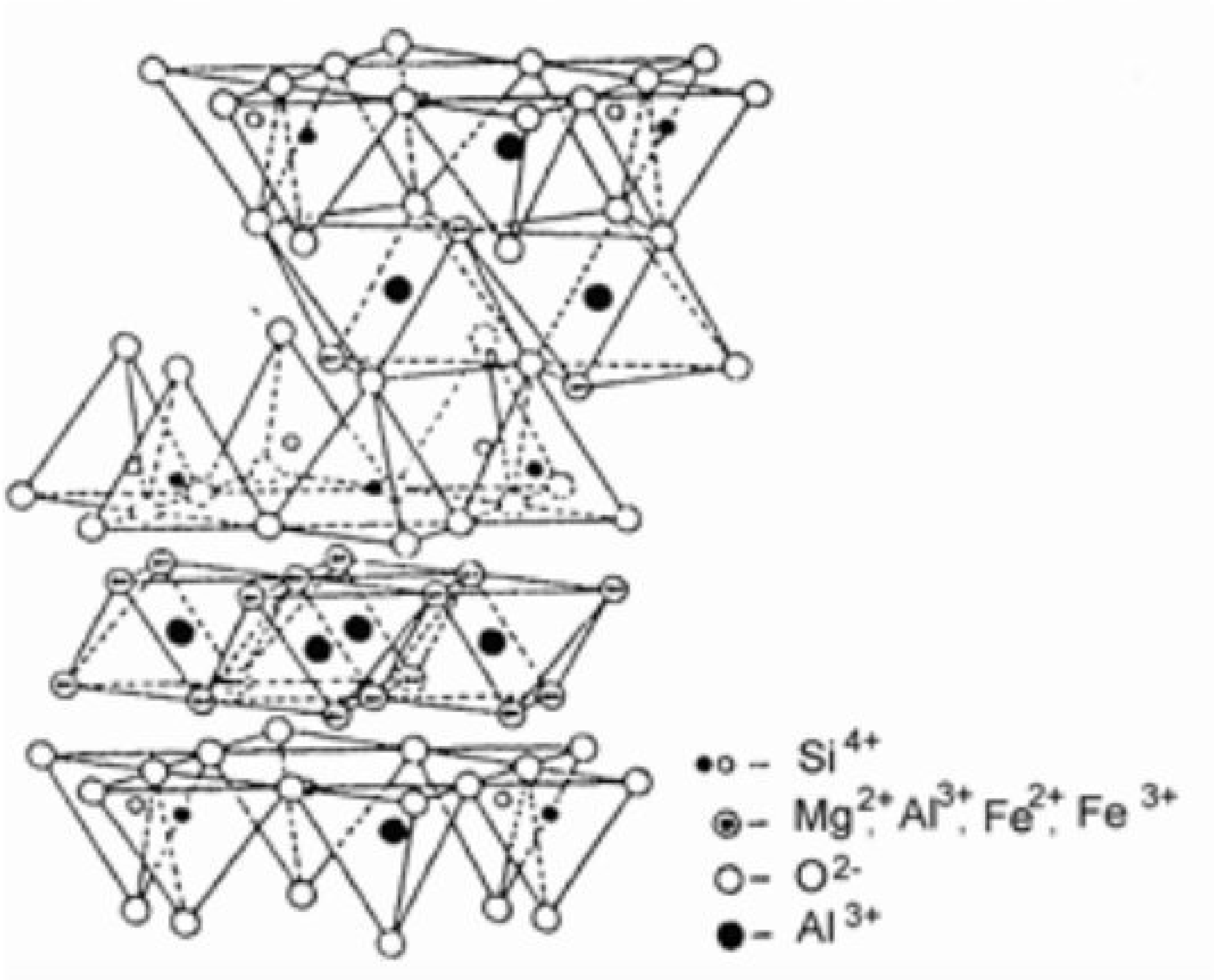


Figura 49. Estructura tridimensional de la clorita

De acuerdo con el tipo estructural y la naturaleza de los cationes del centro de los poliedros, los minerales arcillosos se pueden clasificar de la forma expuesta en la tabla 9.

Tabla 9. Clasificación de los minerales arcillosos según estructura y cationes dominantes

Estructura	Espaciado (Å)	Tetraedros	Octaedros	Intercapa	Mineral
Amorfa					Alofano
1:1	7	Si	Al^{+++}	---------	Caolinita
2:1	10	Si_3Al	Al^{+++}	K^+	Illita
	10	Si_3Al	Al^{+++} Mg^{++} Fe^{++}	K^+	Glauconia
	14	Si_4	Al^{+++} Mg^{++}	Ca^{++}	Montmorillonita
	14	Si_4	Al^{+++}	Ca^{++}	Beidellita
	14	Si_3Al	Fe^{+++} Fe^{++}	Ca^{++}	Nontronita

Una de las propiedades más notables de los minerales arcillosos es su capacidad de intercambio de cationes en procesos reversibles. Esos cationes se instalan en la periferia de los cristales para neutralizar valencias libres de los oxígenos, y en la intercapa, entre las láminas individuales, siendo en esta posición donde el fenómeno adquiere mayor dimensión.

Normalmente existen cinco causas fundamentales que generan las condiciones para que el fenómeno se produzca: sustituciones isomorfas, ausencia de cationes en el centro de los poliedros, cargas de ruptura en los bordes, huecos en la estructura y sustitución de H^{+} de los OH^{-}.

Las sustituciones isomorfas en la red cristalina pueden ser reemplazo de Si^{++++} por Al^{+++} en la capa tetraédrica (como sucede en los illitas) o reemplazo de Al^{+++} por Mg^{++} o por Fe^{++} en la capa octaédrica (caso de las montmorillonitas y las glauconias, entre otros).

Cuando el déficit de carga se genera en la capa tetraédrica, el enlace con el catión de intercapa es enérgico y normalmente es el K^{+} con radio iónico 1,33 Å el que satura la valencia.

El mineral no aumenta su espaciado por el contenido de agua porque el ion K^{+} no se solvata, es decir, no coordina moléculas de agua en su alrededor porque tiene bajo potencial iónico.

Cuando el déficit de carga se genera en la capa octaédrica, el enlace es muy débil y se atraen cationes más pequeños (Na^{+}) o con mayor carga (Ca^{++}, Mg^{++}). Estos iones entran solvatados a la estructura y determinan que el espacio entre capas depende del contenido de agua.

En la figura 50 se muestran dos ejemplos convencionales para señalar el comportamiento diferencial de los dos grupos de tipos estructurales 2:1 debido a que el reemplazo diadójico se produzca en la capa tetraédrica u octaédrica. En este segundo caso los minerales arcillosos cambian fácilmente el espaciado basal entre capas equivalentes porque los iones de intercapa se solvatan.

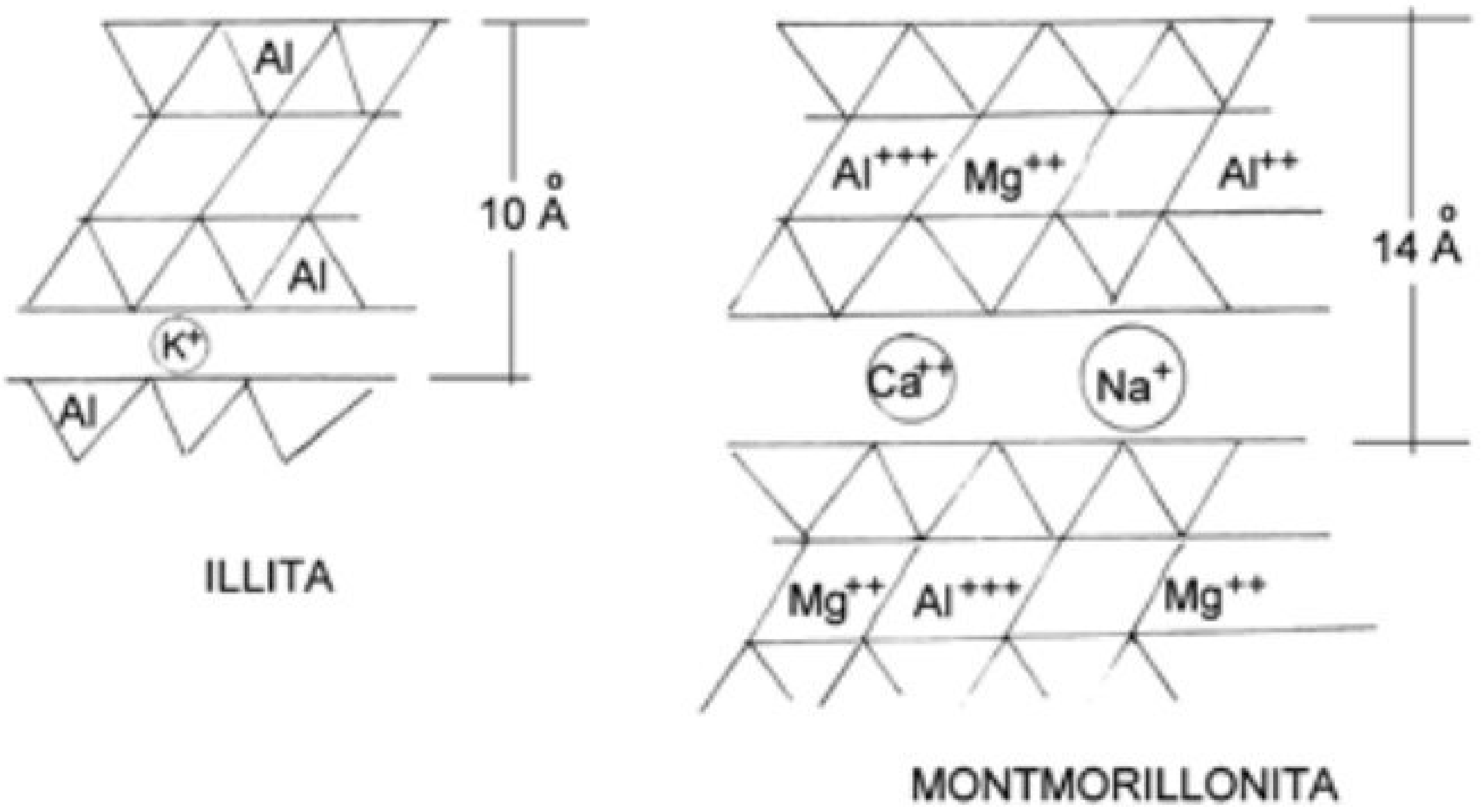


Figura 50. Causas del comportamiento diferencial entre illita y montmorillonita

El apartamiento de las condiciones teóricas de estructuras dioctaédricas o trioctaédricas es otro motivo frecuente de generación de desequilibrios eléctricos que deben compensarse por ingreso de cationes de intercapa. En este caso, la carga eléctrica será generada siempre en la capa octaédrica. Las estructuras se denominan dioctaédricas cuando con dos cationes trivalentes se satisfacen las cargas de los oxígenos y OH^{-} de la capa octaédrica. Son, en cambio, trioctaédricas cuando esas cargas deben ser satisfechas con tres cationes bivalentes cada tres huecos.

En las estructuras dioctaédricas se puede generar carga cuando el hueco de un catión trivalente es ocupado por un catión bivalente, porque en ese caso se ocupan dos de cada tres huecos octaédricos.

En las estructuras trioctaédricas, en cambio, la única posibilidad es un defecto estructural y que falten cationes bivalentes en los huecos octaédricos.

Las *valencias de borde* o *cargas de ruptura* tienen algún efecto solamente en los minerales arcillosos porque se desarrollan en cristales muy pequeños y, por lo tanto, con gran superficie por unidad de volumen. Es la causa principal de que la caolinita presente cierta capacidad de intercambio de cationes, ya que no se produce diadojía en ninguna de las dos capas componentes (tetraédrica ni octaédrica).

Los huecos en la estructura son frecuentes cuando el grado de cristalinidad es bajo, especialmente cuando parte de los tetraedros Si-O son ocupados por Al^{+++}. Esto provoca distorsión en los cristales que frecuentemente impiden el ingreso de cationes y se forman huecos creando déficit de cargas que pasa a ser compensadas por cationes de intercapa o de borde.

La sustitución de H^+ de los OH^- por cationes más voluminosos en la capa basal de la caolinita es capaz de generar en este mineral una cierta capacidad de intercambio de cationes.

La capacidad de intercambio de cationes (CIC) se expresa normalmente en miliequivalentes por 100 gramos (meq/100 gr) y se determina tratando el mineral arcilloso a $pH = 7$ con solución concentrada de acetato de amonio. El ion NH_4^+ desplaza a los cationes intercambiables, determinándose luego su contenido por micro destilación.

$$A^-C^+ + CH_3COONH_4 = A^-NH_4^+ + CH_3COOC$$

→

calor

$A^-H^+ + NH_3$

Los valores normales de CIC para los distintos grupos de minerales arcillosos son relativamente constantes, e incluso su determinación representa una guía en la identificación.

Tabla 10. Capacidad de intercambio catiónico de los minerales arcillosos

Minerales	CIC (meq/100gr)
Caolinita	3-15
Illita	10-40
Esmectitas	80-150

En las reacciones de intercambio catiónico en los suelos el poder de reemplazo sigue un orden que es función del potencial iónico. Por lo tanto, de mayor a menor es:

$$H^+ \; NH_4^+ \; Mg^{++} \; Ca^{++} \; K^+ \; Na^+$$

También los minerales arcillosos tienen posibilidad de intercambio de aniones por varios mecanismos, de los cuales el más común es con un catión periférico de puente: Arcilla$^-$– Ca^{++} - (An$^-$).

Estos efectos, sin embargo, son poco significativos y no tienen la posibilidad de ayudar a determinar el grupo de mineral arcilloso, como lo tienen los cationes intercambiables.

Los minerales arcillosos constituyen un componente esencial de los suelos en climas intermedios y resulta, entonces, de extrema importancia la determinación de su naturaleza, aunque el tamaño de grano tan pequeño impide el reconocimiento aún bajo el microscopio óptico normal de 1200 aumentos.

Es posible el uso de métodos más sencillos para la identificación sin tener que recurrir al microscopio electrónico. Normalmente el uso de difracción de rayos x y de análisis térmico diferencial permiten reconocer, con la precisión necesaria para fines agronómicos, cualquier mineral arcilloso (véase: *Introducción a la argilología.* Ford I, 1998).

6.3.2. Carbonatos

Estos minerales están compuestos por el anión $CO_3^=$ con el C^{+4} en coordinación triangular y un catión bivalente, de los cuales los importantes son Ca^{++} y Mg^{++}.

Tienen gran interés agronómico porque su formación exige condiciones de pH>7 y porque depósitos de estos minerales pueden usarse para «encalar» suelos ácidos.

Las reacciones fundamentales que controlan la formación de carbonatos en el ciclo superficial, generando estos minerales secundarios, son los siguientes:

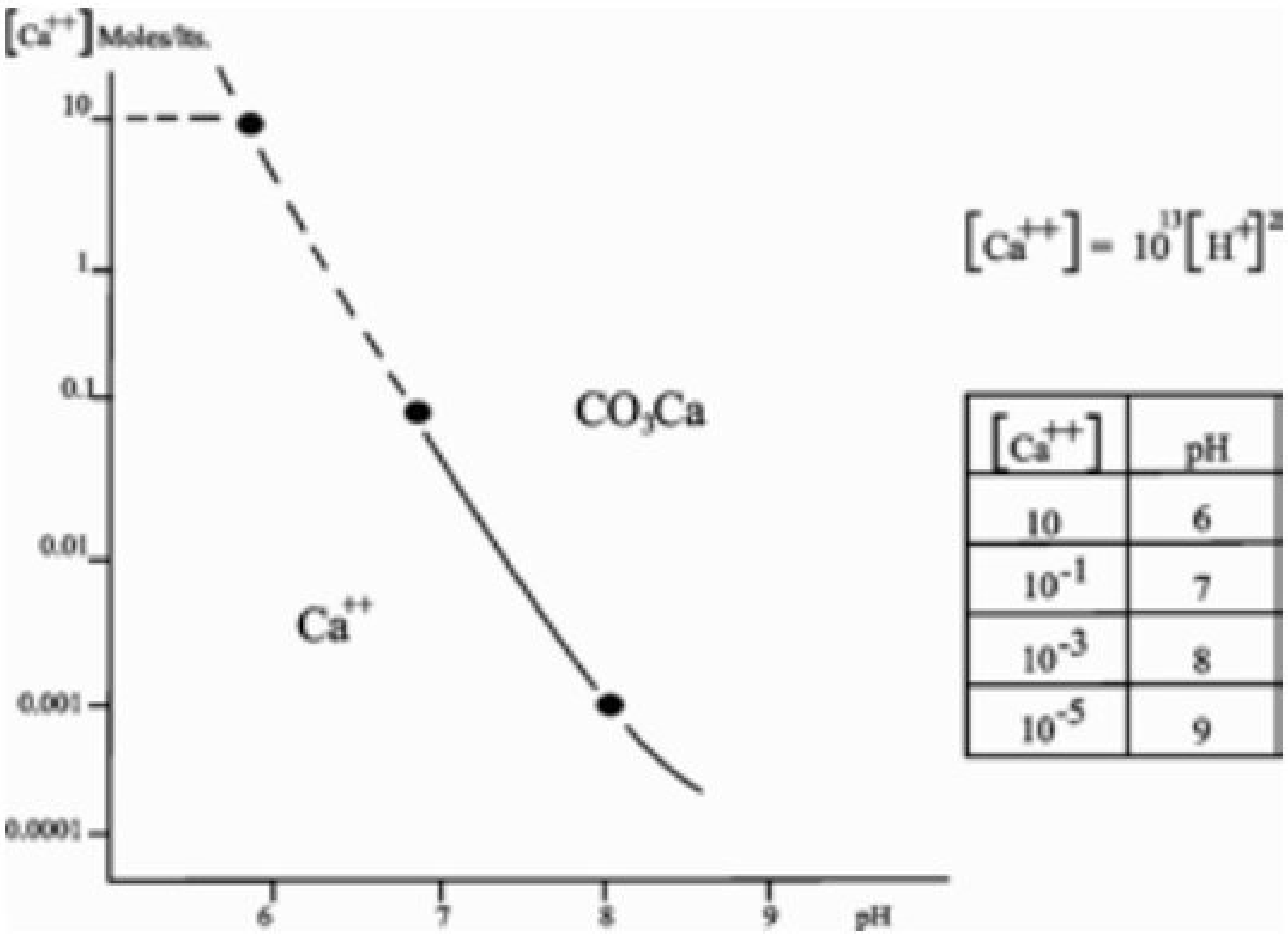
$$Ca^{++} + CO_2 + H_2O \leftrightarrow CO_3\,Ca + {}_2H^+$$

$$CO_3\,Ca + CO_2 + H_2O \leftrightarrow (CO_3\,H)_2\,Ca$$

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow CO_3\,H^- + H^+ \leftrightarrow CO_3^= + 2\,H^+$$

La presión parcial de CO_2 en la atmósfera es de $10^{-3,5}$, lo que determina que cuando el agua está en equilibrio tiene un pH = 5,7 ($2 * 10^{-6\text{ moles}}$/ lt).

Para determinar la concentración de Ca^{++} necesaria para que precipite CO_3 Ca (calcita) en cada pH cuando las aguas están en equilibrio con el CO_2 atmosférico se usan ecuaciones que permiten construir la gráfica de la figura 51.



$[Ca^{++}]$	pH
10	6
10^{-1}	7
10^{-3}	8
10^{-5}	9

Figura 51. Comportamiento del calcio en función del pH

Estas condiciones de equilibrio determinan que los depósitos químicos de carbonato en medio marino y océanos no pueden producirse por debajo de ciertas profundidades, porque allí la baja temperatura y la alta presión aumentan la solubilidad del CO_2.

La ecuación $CO_3 Ca + CO_2 + H_2O$ ⍰ $(CO_3 H)_2 Ca$ desplaza a la derecha su puntos de equilibrio y se hace estable al bicarbonato soluble.

Esa condición de equilibrio gobierna también la escasez de calizas en rocas de más de 1700 millones de años, cuando la atmósfera no tenía oxígeno sino solamente CO_2.

A partir de esa edad de la Tierra los vegetales aparecen en los continentes, asociados al fenómeno de saturación de oxígeno de las aguas oceánicas y aparición de oxígeno en la atmósfera.

6.3.3. Óxidos

Los más importantes son los óxidos de hierro que se presentan en diversos estados de oxidación e hidratación. El estado original del hierro en los minerales primarios es variado, puede observarse en la tabla 11.

Tabla 11. Estados del hierro en diversos minerales
Fe^{++} en biotita, anfíboles, piroxenos y pridotos.
Fe^{++} y Fe^{+++} en magnetita ($Fe_3O_4 = FeO. Fe_2O_3$).
Fe^{++} en ilmenita ($Fe Ti O_3 = Fe O TiO_2$).
Fe^{++} en pirita y pirrotina (Fe S).

Durante el proceso de meteorización el hierro de la estructura cristalina de los minerales primarios es extraído por la acción del H_3O^+ y sometido a las condiciones del medio ambiente, en cuanto a pH y condiciones de óxido reducción. El tema ya fue planteado al tratar el $O^=$ como agente de meteorización.

Aquí solo se justifica señalar los aspectos cuantitativos que definen los campos de estabilidad de Fe^{+++}, Fe^{++}, Fe_2O_3 y Fe_3O_4. La reacción más importante es:

$$Fe^{++} + 3H_2O \leftrightarrow Fe(OH)_3 + 3H + e$$

Para esta ecuación, el potencial de óxido reducción es:

$$Eh = Eh^{o} + \frac{0{,}059}{n} \lg \frac{[H^{+}]}{[Fe^{++}]} \text{ donde } Eh^{o} = 0{,}77 \text{ v}$$

En el equilibrio $[Fe^{++}] = 10^{-6}$ moles/litro ∴ $Eh = 1{,}08 - 0{,}177$ pH.

Los óxidos de hierro férrico son diferentes según el grado de hidratación (figura 52).

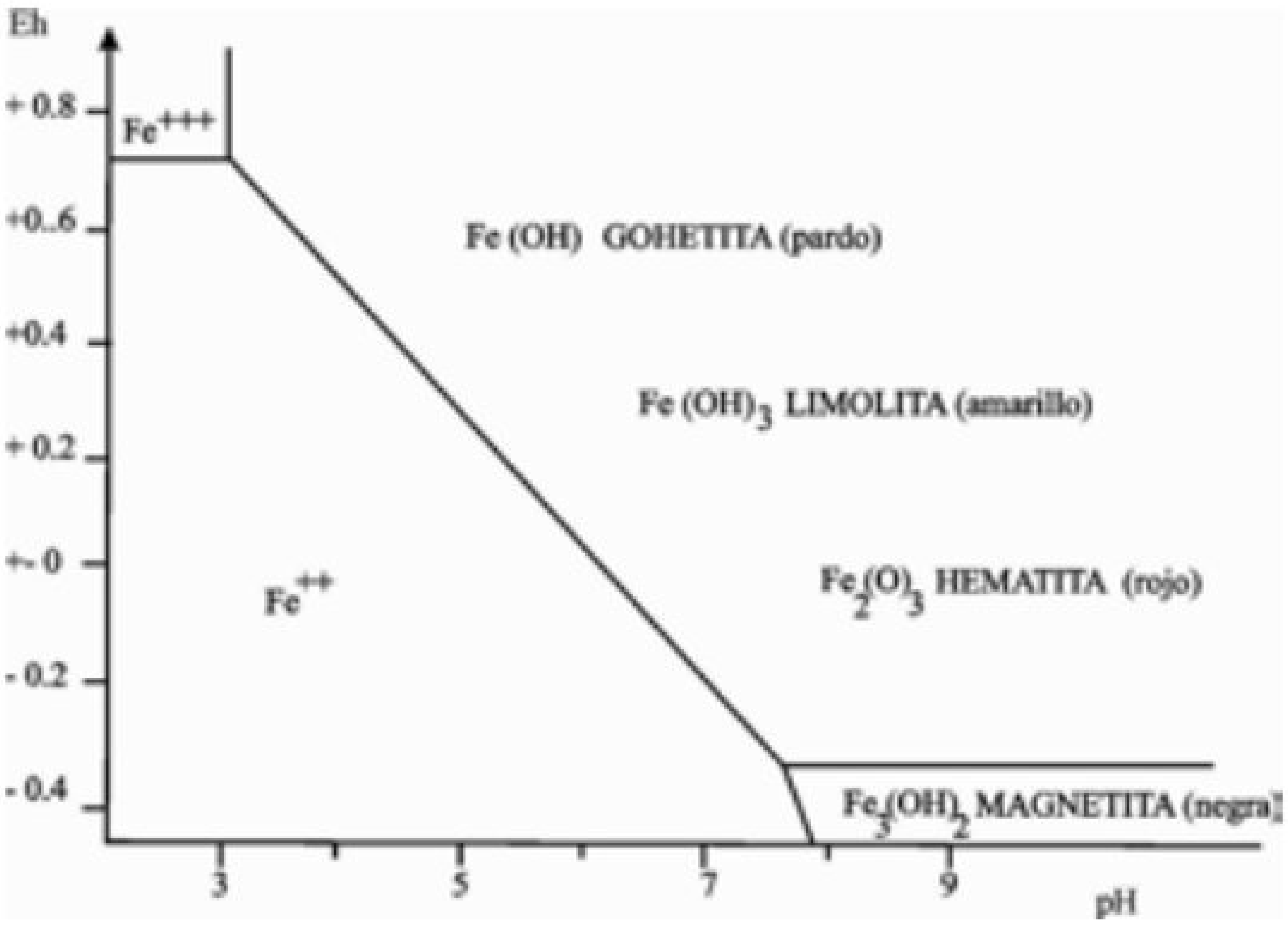


Figura 52. Eh en función del pH

6.4. Ejercicios

Conteste brevemente las siguientes preguntas:

1. ¿Por qué los anfíboles son más resistentes a la meteorización que los piroxenos siendo ambos inosilicatos?
2. ¿Por qué la anortita ($Si_2Al_2O_8Ca$) es más alterable que la albita (Si_3Al_8Na) siendo el calcio bivalente y el sodio monovalente con igual radio iónico?
3. Compare la sumatoria de la fuerza electrostática de enlace (Σf.e.e) de olivina y anortita. ¿Cuál de estos dos minerales es más meteorizable?
4. ¿A qué mineral se altera la biotita?
5. En clima templado: ¿a qué mineral arcilloso se alteran las plagioclasa?, ¿qué catión debe de capturar de otros minerales?
6. ¿A qué pH precipita el $CaCO_3$ cuando la concentración de Ca^{++} es de 0,01 mol /L?
7. ¿En qué estado iónico se encuentra el hierro a pH 7,5 y eH = 0,5?
8. Cite los cuatro iones más abundantes de la corteza terrestre.
9. ¿En qué minerales llega el cobalto a la superficie de la tierra? ¿Qué radio iónico tiene? ¿De qué elementos es diadoco?
10. Enumere los factores de intensidad.

Bibliografía recomendada:

BOSSI, Jorge, A. FERNÁNDEZ., G. ELIZALDE, I. FORD (1986), *Curso de Geología*, Tomo III. Erosión y transporte. Montevideo. Facultad de Agronomía.

BOSSI, Jorge, Lorenzo FERRANDO (2001), *Carta geológica del Uruguay a escala 1/500.000*. Montevideo: Facultad de Agronomía (versión CD).

DANA, Edward Salisbury, Cornelius S. HURLBUT (1956), *Manual de Mineralogía*. Buenos Aires: Ed. Reverté.

EVIA, Gerardo, Eduardo GUDYNAS (2000), *Ecología del paisaje en Uruguay. Aportes para la conservación de la diversidad biológica*. Sevilla: Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, Junta de Andalucía, AECI.

FORD, I. (1984), *Dinámica mineral en el suelo. Algunos puntos de referencia para su estudio*. México: Universidad Autónoma de Chapingo.

——— (1988), *Introducción a la Argilología, ciencia de las arcillas*. Montevideo. Facultad de Agronomía.

GINZBURG, I. J. (1960), *Principles of Geochemical prospecting*. London-New York: Pergamon Press.

ORTIZ, Alejandra (2009), *Glosario de geología e hidrogeología*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

PEDRO, Georges (1968), «Distribution des principaux types d'alterations chimiques á la surface du globe. Presentation d'une esquisse geographique.» Revue Geogr. Phys. et Geol. Dynam. x, 5: 457-470.

TARDY, Yves (1969), *Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Memoire du Service de la carte géologique d' Alsace et Lorraine, N° 31*. Université de Strasbourg.

CAPÍTULO 7.

Geología del Uruguay

La geología es la ciencia natural que estudia los materiales del subsuelo, y sus leyes permiten determinar las relaciones geométricas en profundidad a partir de observaciones en superficie. La geología de una región o de un país, como este caso, consiste en la descripción ordenada de los fenómenos sucedidos (estratigrafía) y las rocas formadas en cada fenómeno.

Desde el punto de vista agronómico tienen que ser tenidos en cuenta solo aquellos fenómenos que producen modificaciones sustanciales y aquellas rocas que ocupan grandes extensiones como para constituir el material madre de unidades de asociaciones de suelos, o para tener comportamiento hidrogeológico regional.

La edad de las rocas se mide en términos absolutos o relativos. La edad absoluta se obtiene utilizando isótopos radiactivos que permiten determinar una edad numérica (geocronología). La edad relativa se puede obtener con restos fósiles o por el principio de superposición para estructuras subhorizontales. En Uruguay hay rocas metamórficas e ígneas que pueden ser datadas solo por geocronología (rocas del Predevoniano), rocas sedimentarias que pueden ser datadas por fósiles y rocas volcánicas en estructura horizontal. Existe una columna estratigráfica internacional que divide la historia de la Tierra en períodos y en edades para los límites entre ellos.

La estratigrafía se expresa en una columna (columna estratigráfica) que contiene las unidades más jóvenes en la parte superior y hacia la base se van colocando unidades en orden de edad creciente.

A nivel mundial se acepta la columna estratigráfica de UNESCO-IUGS (1999) que plantea en términos generales el nombre de los períodos y eras reconocibles.

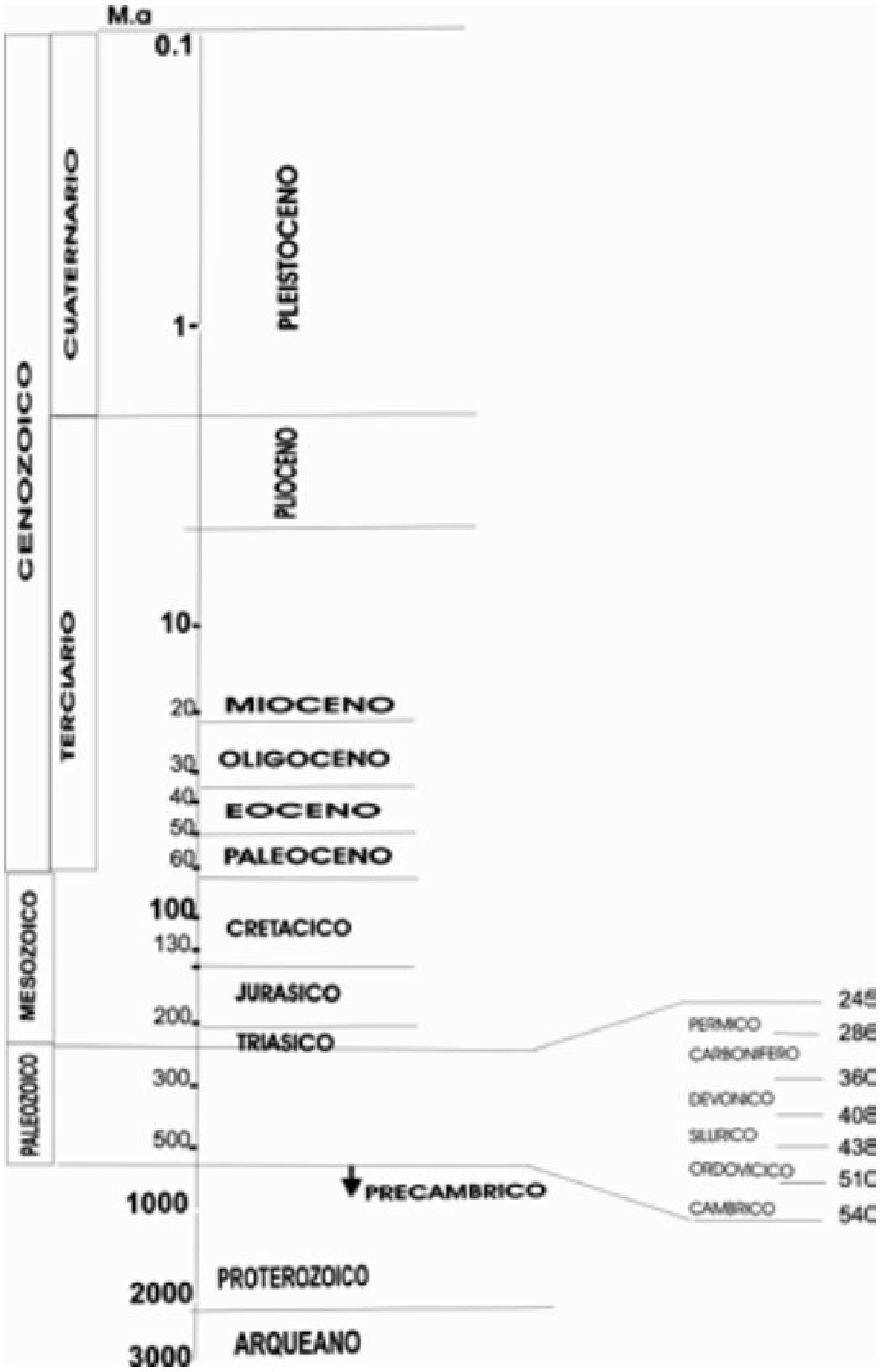

M.a
0.1
1
10
20
30
40
50
60
100
130
200
300
500
1000
2000
3000
CENOZOICO
CUATERNARIO
TERCIARIO
MESOZOICO
PALEOZOICO
PLEISTOCENO
PLIOCENO
MIOCENO
OLIGOCENO
EOCENO
PALEOCENO
CRETACICO
JURASICO
TRIASICO
PRECAMBRICO
PROTEROZOICO
ARQUEANO
PERMICO
CARBONIFERO
DEVONICO
SILURICO
ORDOVICICO
CAMBRICO
24
28
36
40
43
51
54

Figura 53. Estratigrafía mundial

En Uruguay existen unidades de casi todos los períodos a las que se les han dado nombres litoestratigráficos locales para identificarlas.

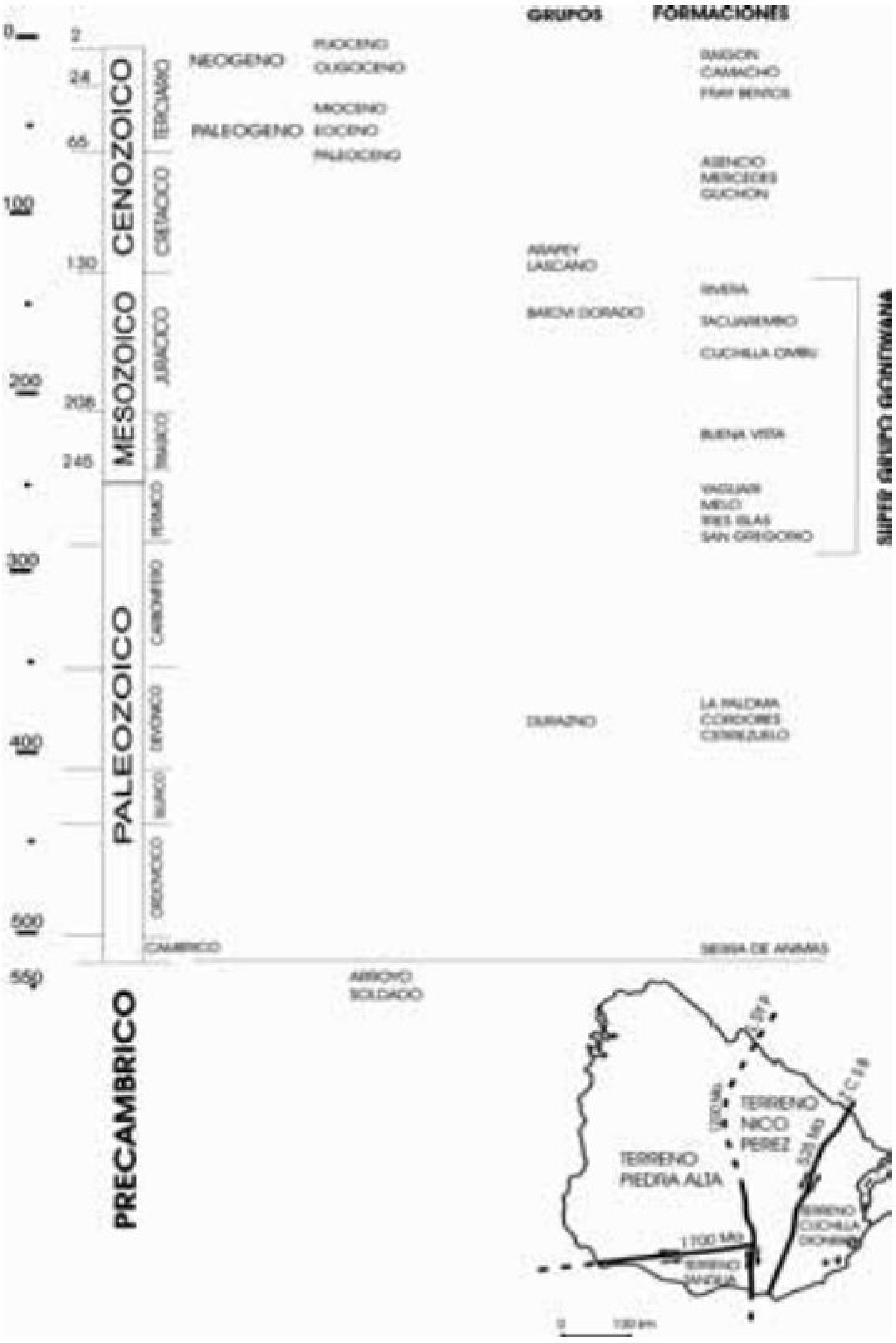

GRUPOS
FORMACIONES
0
2
24
65
100
130
200
208
245
300
400
500
550
CENOZOICO
MESOZOICO
PALEOZOICO
PRECAMBRICO
TERCIARIO
CRETACICO
JURASICO
TRIASICO
PERMICO
CARBONIFERO
DEVONICO
SILURICO
ORDOVICICO
CAMBRICO
NEOGENO
PALEOGENO
PLIOCENO
OLIGOCENO
MIOCENO
EOCENO
PALEOCENO
RAIGON
CAMACHO
FRAY BENTOS
ASENCIO
MERCEDES
GUICHON
ARAPEY
LASCANO
BARON DORADO
RIVERA
TACUAREMBO
CUCHILLA OMBU
BUENA VISTA
YAGUARI
MELO
TRES ISLAS
SAN GREGORIO
SUPER GRUPO GONDWANA
DURAZNO
LA PALOMA
CORDOBES
CERREZUELO
SIERRA DE ANIMAS
ARROYO
SOLDADO
TERRENO
NICO
PEREZ
TERRENO
PIEDRA ALTA
1700 Ma
TERRENO
TANDILIA
TERRENO
CUCHILLA
DIONISIO
0
100 km

Figura 54. Columna estratigráfica del Uruguay

7.1. Secuencia estratigráfica

7.1.1. Estratigrafía

Es la disciplina geológica que estudia la edad relativa de las rocas.

En rocas sedimentarias y lavas rige el principio de superposición, siendo la más joven la que queda en el estrato superior y la más antigua la del estrato inferior.

Para las rocas metamórficas se incluyen conceptos estructurales.

En el caso de las rocas ígneas pueden ser filones o intrusiones.

7.1.2. Estrato

Es una unidad de roca caracterizada por propiedades unificantes que la distinguen de las rocas adyacentes.

Los criterios estratigráficos pueden ser:

- *Litoestratigráficos:* cuando no se tienen en cuenta edades absolutas.

- *Cronoestratigráficos:* cuando se basan en edades absolutas.
- *Bioestratigráficos:* cuando se basan en registros fósiles.
- *Tectonoestratigráficos*.

7.2. Unidades tectonoestratigráficas

Las unidades tectonoestratigráficas son terrenos que consisten en bloques de litósfera limitados por fallas transcurrentes subverticales que generan bandas de milonitas de varios kilómetros de ancho y centenares de longitud. Se emplea para rocas plutónicas y metamórficas en áreas generadas por bloques adosados por derivas continentales. Además tiene una sucesión estratigráfica y asociación de rocas completamente distintas a la de los bloques vecinos. En los terrenos se reconocen unidades menores que se denominan *grupos*, cuando se conoce la secuencia estratigráfica interna (o formaciones), y *complejos* cuando no se sabe la edad relativa. Así como la litoestratigrafía puede ser determinada por una perforación, la tectonoestratigrafía se determina solamente a partir de cartas geológicas a escala ≥ 1/100.000 (1/50.000 ideal). En breve, se pueden definir los *terrenos* como asociaciones litológicas ubicadas en áreas generadas por bloques adosados por derivas continentales.

En Uruguay tienen importancia en el precámbrico (>520 Ma) y han incidido en el comportamiento del subsuelo porque se unen con fallas de gran entidad que permanecen activas hasta estos días.

La distribución de las diferentes rocas depende en gran medida de estas fallas, lo mismo sucede con los suelos y el uso de la tierra.

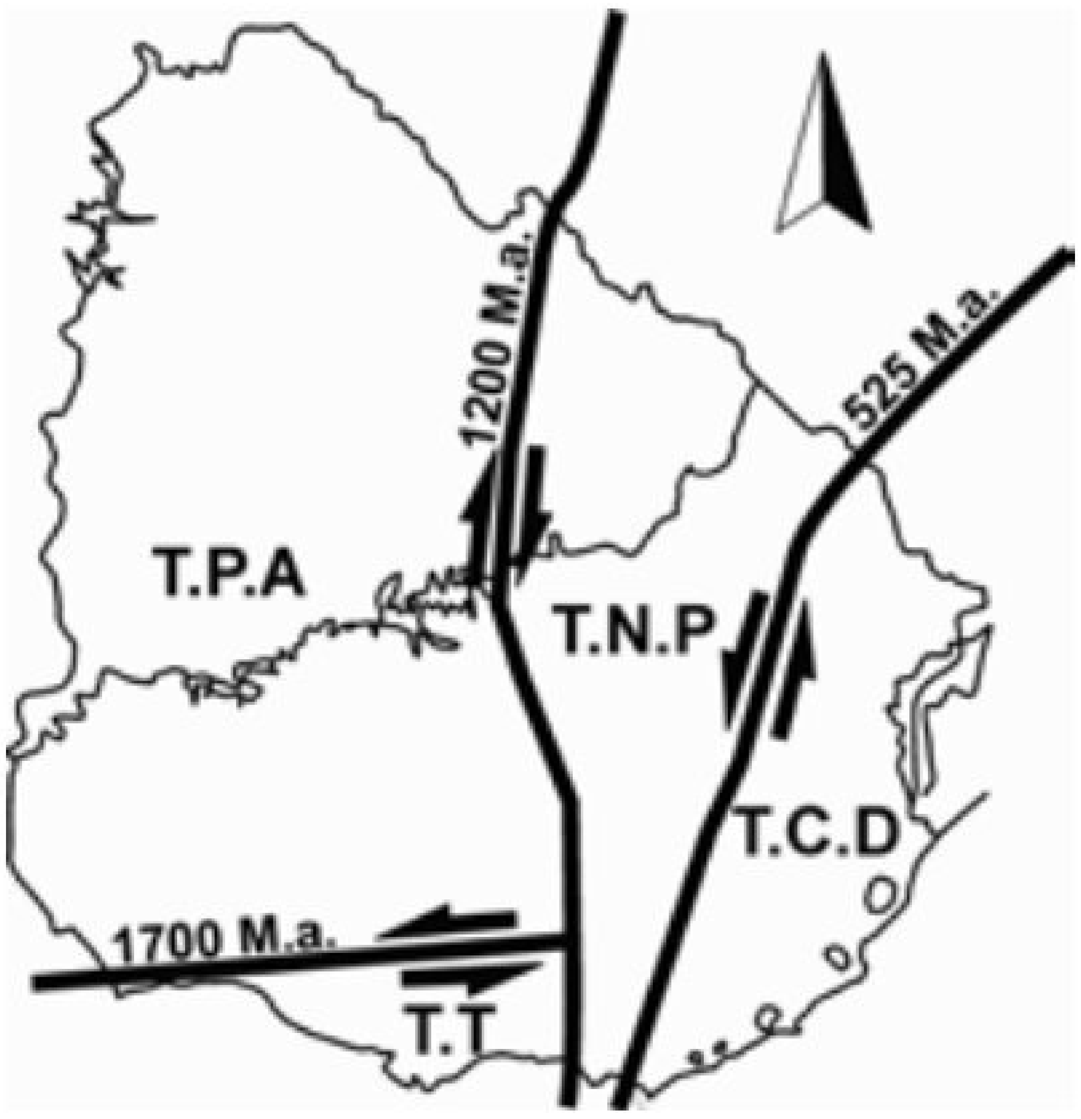


Figura 55. Terrenos en Uruguay

7.2.1. Terreno Piedra Alta (TPA)

Está compuesto por rocas ígneas y metamórficas, de 2000±100 Ma de antigüedad, que fueron intensamente meteorizadas luego de largos periodos de erosión.

Resulta un paisaje de extensas praderas naturales con aislados afloramientos rocosos y topografía suavemente ondulada. Dominan los granitos, gneisses y migmatitas, conteniendo bandas metamórficas relativamente delgadas. La principal es el Cinturón San José, compuesto por la Formación (Fm.) Paso Severino y la suite magmática Isla Mala. Hacia 1800 Ma se produjo la inyección de varios miles de filones de microgabro, de 10 a 30 m de ancho, separados 700 m entre sí.

7.2.2. Terreno Tandilia (TT)

El Terreno Tandilia se reconoció por la existencia de una faja milonítica de rumbo N80E que pasa por la ciudad de Colonia y separa asociaciones litológicas con rocas ígneas básicas radicalmente diferentes:

- Al N, en el Terreno Piedra Alta, prasinitas (2150 Ma), hornblenditas post-orogénicas (2050 Ma), gabros en facolito (2000 Ma) y haz de diques de microgabro (1800 Ma), (Bossi y Schipilov: 2007).
- Al S, en lo que se denomina Terreno Tandilia (Bossi *et al.:* 2005) aparecen las únicas ortoanfibolitas del W del Lineamiento Sarandí del Yí-Piriápolis, en el Cerro de Montevideo de edad 2200±100 Ma.

En Uruguay este terreno contiene la Fm. Montevideo y el batolito de Soca.

7.2.3. Terreno Nico Pérez (TNP)

Este terreno está comprendido entre las zonas de cizalla Sarandí del Yí-Piriápolis al W y Sierra Ballena al E. Se pueden identificar como caracteres comunes un relieve ondulado fuerte, elevada pedregosidad y abundancia de suelos superficiales. Es el terreno más complejo, conteniendo rocas desde 3410 Ma a 530 Ma, en una superposición de procesos de litologías y estructuras geológicas similares pero en tiempos bien diferentes:

- Complejo La China de 3410 Ma, constituido por una metatonalita observable en la cuenca del arroyo La China, asociada a gabros, rocas ultramáficas y serpentinitas cuarzosas.
- Grupo Cebollatí de 2750 Ma, integrado por micaesquistos, cuarcitas y mármoles dolomíticos.
- Fm. Valentines, de 2700 Ma, integrado por valentineritas (magnetita, cuarzo, piroxenos), piroxenitas, gneisses y granitos de facies granulita (alta T y P).
- Batolito de Illescas, de 1800 Ma; se trata de un granito intrusivo en rocas rígidas.
- Grupo Parque UTE, de 1600-1400 Ma, formado por prasinitas en la base, dolomitas en la parte media y filitas en la cima.
- Grupo Mina Verdún, de 1100-1400 Ma, con metariolitas en la base, calizas en la parte media y tufos en la cima.
- Fm. Las Ventanas, de edad recientemente determinada por Oyanthçabal *et al.* (2010) en 573±11 Ma. Está integrada por basaltos en la base y conglomerados en el cuerpo principal, mostrando condiciones de esfuerzos distensivos

(fosa tectónica). Las pelitas del techo son afectadas por una cabalgadura de 570 Ma. (Blanco y Gaucher: 2004).

- Grupo Arroyo del Soldado, integrado por depósitos marinos de plataforma implicando borde continental pasivo, hundiéndose hacia el E. Dicho grupo se depositó entre 570 y 540 Ma, según datos de granitos intrusivos (Guazunambí 535 Ma) y asociaciones litológicas previas (Gaucher: 2000).
- Escama tectónica Carapé, constituida por tres formaciones: *Edén*, compuesta por anfibolitas y gneisses intensamente plegados; *Mataojo* integrada por dolomitas marmóreas y *Marco de los Reyes* con bancos de cuarcitas con óxido de hierro y calizas de gran pureza.

En lo esencial el TNP muestra gran heterogeneidad de rocas y está experimentando un levantamiento isostático que genera alta pedregosidad y topografía quebrada. Se sabe que al N del departamento de Tacuarembó se levantó 1400 m en 130 Ma (0,01 mm/año) porque la Fm. Cuaró, que allí aflora, se encuentra a 1400 m de profundidad en el departamento de Artigas.

7.2.4. Terreno Cuchilla Dionisio (TCD)

Se desarrolla al E de la zona de cizalla de Sierra Ballena. Las características generales son similares a las del Terreno Nico Pérez en relieve y abundancia de suelos superficiales. La diferencia esencial es que no contiene rocas carbonatadas, las que son muy frecuentes tanto en los grupos Cebollatí, Parque UTE y Minas Verdún, como en el grupo Arroyo del Soldado. Este terreno resultó dividido en dos bloques por la fosa tectónica de la laguna Merín. El bloque norte contiene metamorfitos de todos los grados y magmatismo plutónico (granitos), filoniano (granófiros) y volcánico (riolitas). Abarca los micaesquistos de la Fm. Paso del Dragón (Preciozzi *et al.*: 1985), el vulcanismo de la Fm. Sierra de Ríos de 572± 11 Ma (Bossi *et al.*: 1993) y el granito de Dionisio de 550±15 Ma (Umpierre y Halpern: 1971).

El bloque sur presenta tres unidades bien diferenciadas: al este la Fm. Rocha compuesta por filitas y pelitas de rumbo N30E vertical; en el centro se desarrollan rocas metamórficas de alto grado (Masquelín: 2006); al W hace intrusión el batolito de Aiguá.

7.3. Unidades litoestratigráficas

Se identifican por asociaciones de rocas que se mantienen constantes en unidades cartografiables y se diferencian claramente de las vecinas. Se definen como supergrupo, grupo, formación, miembro y capa:

Grupo: unidad litoestratigráfica constituida por dos o más formaciones.

- *Formación:* es una unidad generada en condiciones constantes, dando lugar a estratos de roca con un tipo litológico dominante, netamente diferenciable de los adyacentes. Constituye una unidad perfectamente delimitable en los relevamientos geológicos.

- *Miembro:* es una de las litologías características de una formación, compuesta por varios tipos de roca.

7.3.1. Devónico. Grupo Durazno (Bossi y Navarro, 1991)

Durante el Devónico inferior se acumulan sedimentos marinos típicamente transgresivos vinculados a mares poco profundos o ambientes litorales. El ingreso del mar sobre el continente produce depósitos groseros con clastos que pueden alcanzar varios centímetros de diámetro por la cercana proveniencia de los fragmentos. A medida que siguen ingresando esos depósitos groseros se mantienen cerca de la costa, pero en las partes más profundas y alejadas la granulometría disminuye. En zonas muy alejadas de la antigua costa se depositan sedimentos arcillosos de grano extremadamente fino. Al producirse la regresión la secuencia de granulometría va en aumento hasta que, cerca de la costa, aparecerán areniscas gruesas y conglomerádicas.

El grupo Durazno está integrado por tres formaciones que son concordantes entre sí:

- En la base, la Fm. Cerrezuelo, que puede alcanzar espesores de 130 m, compuesta por areniscas ricas en feldespatos de grano muy grueso, con delgados niveles de areniscas más finas y esporádicos lentes de lutitas caoliníticas.
- En la parte media, la Fm. Cordobés, formada por rocas pelíticas con sulfuros y sustancia orgánica, que puede alcanzar hasta 100 m de potencia.
- En la cima, la Fm. La Paloma —de 30-40 m de máximo espesor actual—, compuesta por areniscas finas, violáceas, muy micáceas.

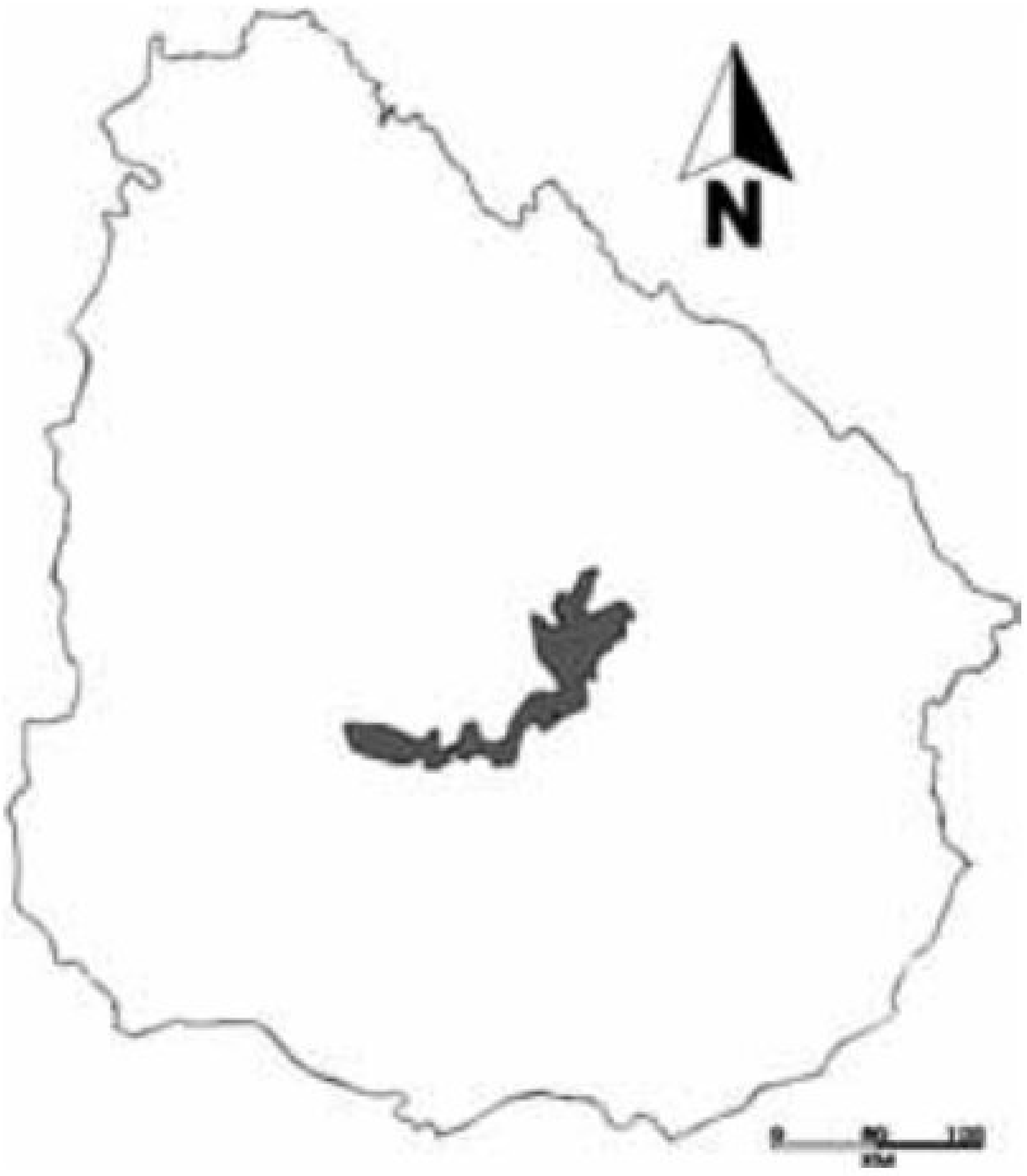


Figura 56. Área de afloramiento del Grupo Durazno

7.3.1.1. Formación Cerrezuelo

Reposa en discordancia sobre rocas cristalinas. Las areniscas feldespáticas de grano muy grueso predominan en la base mientras que, areniscas conglomerádicas medias y finas, dominan hacia la cima.

Las areniscas contienen elevada proporción de granos de feldespato (>25%) y se denominan arcosas. En superficie, estos feldespatos se han transformado en nódulos arcillosos por la meteorización (caolinita).

7.3.1.2. Formación Cordobés

Unidad litoestratigráfica compuesta por lutitas grises piritosas muy fosilíferas, secundariamente por rocas limosas y areniscas muy finas. La estratificación es horizontal o laminar causada por delgados niveles micáceos. En superficie, los afloramientos naturales son excepcionales o nulos, pues presentan enorme facilidad de transformarse en suelo.

7.3.1.3. Formación La Paloma

Compuesta por areniscas finas, muscovíticas, de color lila, con estratificación laminar cruzada. Tiene poca importancia desde el punto de vista agronómico porque la superficie de afloramiento es muy reducida y la granulometría tan fina brinda escasas posibilidades hidrogeológicas.

7.3.2. Supergrupo Gondwana

7.3.2.1. Formación San Gregorio

Conjunto de depósitos sedimentarios acumulados durante la preeminencia de las condiciones glaciales ya que Uruguay estaba ubicado dentro de un círculo polar. Las rocas dominantes son tillitas, lutitas várvicas y areniscas feldespáticas de estratificación cruzada. Abarca un área extensa y constituye un acuífero que puede suministrar hasta 7000 lts/hora.

7.3.2.2. Formación Tres Islas

Integrada exclusivamente por rocas sedimentarias detríticas entre las que las areniscas constituyen casi el 90% de las descripciones de campo. Presentan estratificación cruzada, poseen cemento arcilloso y son relativamente friables. Se sugiere un ambiente de sedimentación fluvial en el E, deltaico en la parte central y marino hacia el W. Esta Fm. tiene importancia, pues constituye el único acuífero poroso en una extensa zona de Cerro Largo y Tacuarembó. Debe manejarse con cuidado porque niveles piritosos entregan agua con óxidos de hierro.

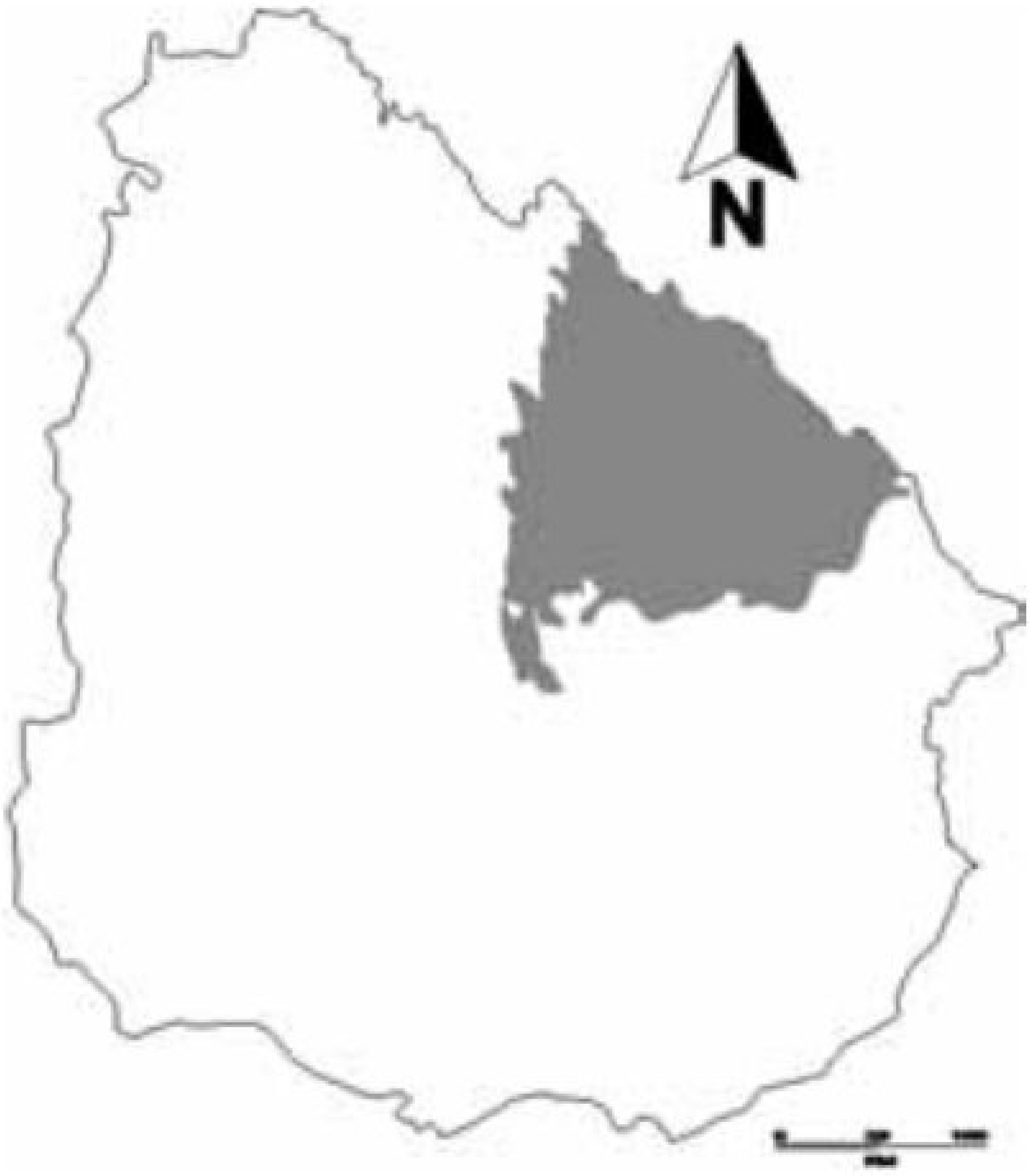


Figura 57. Área de afloramiento del Supergrupo Gondwana

7.3.2.3. Formación Melo

Predominio absoluto de rocas sedimentarias detríticas de grano fino a muy fino de colores reductores (grises, verdes). Las rocas dominantes son limolitas (60%), calizas (20%) y areniscas finas (20%). Las limolitas son bien seleccionadas, micáceas y arcillosas, con estratificación paralela; pero también puede ser microcruzada u ondulada. El color más frecuente es gris, siguiendo verde y negro en abundancia decreciente. Las calizas son de grano medio a fino y tenaces. El color dominante es gris cuando frescas, amarillentas o castaño cuando meteorizadas.

Las areniscas son finas y muy finas, bien seleccionadas, siempre micáceas y a veces feldespáticas. Los colores dominantes son verdes y grises.

La edad fue determinada como Pérmico Medio a Superior, en base a cantidad de fósiles (mesosaurios). El comienzo de sedimentación (miembro Fraile Muerto) de estos materiales se produjo por transporte en corrientes de agua suaves y poco cargadas de materiales en suspensión.

En los niveles medios (miembro Mangrullo), donde abundan los mesosaurios fósiles, el ambiente es reductor y alcalino con depósito de pirita, carbonato y abundante sustancia orgánica.

En los niveles superiores (miembro Paso Aguiar), las condiciones de sedimentación corresponden a un ambiente marino poco profundo o a planicies costeras.

7.3.2.4. Formación Yaguarí

Comprende secuencias de areniscas finas, muy finas y limolitas de colores rojos o con estratos rojos a nivel de cada afloramiento. Es la unidad de mayor superficie de afloramiento dentro de las rocas del supergrupo Gondwana. Presenta sedimentos de granulometría fina y aparición de colores rojos. En la base contiene 60% de limolitas, 35% de areniscas y 5% de lutitas.

Las areniscas son micáceas y generalmente contienen muchos granos de feldespato. El cemento arcilloso domina sobre el calcáreo. Las condiciones de sedimentación fueron similares a las de la Fm. Melo, con la única diferencia que las aguas contienen mayor cantidad de oxígeno disuelto y es posible pasar del Fe^{++} al Fe^{+++} y precipitar como óxido rojo.

7.3.2.5. Formación Buena Vista

Integrada por areniscas finas, gruesas, medias y conglomerádicas, interestratificadas con conglomerados y lentes calcáreos. Las areniscas son siempre rojas y feldespáticas. Las areniscas de grano grueso a muy grueso son más frecuentes que las de grano fino. Los conglomerados tienen hasta un metro de espesor y están compuestos por clastos cuarzosos rodados de tres a seis centímetros de diámetro.

7.3.3. Grupo Batoví Dorado (Bossi: 2007. Regiones geológicas)

Aparece como relicto de erosión en el departamento de Cerro Largo y aflora luego como una faja continua de dirección N-S desde la ciudad de Rivera hasta el departamento de Durazno. Hacia el W esta faja aflorante queda cubierta por los derrames basálticos de las formaciones del Grupo Arapey y los sedimentos más modernos. Este grupo está integrado por tres formaciones: Cuchilla Ombú, Tacuarembó y Rivera.

7.3.3.1. Formación Cuchilla Ombú

Aflora fragmentariamente en el borde oriental del grupo y en algunos relictos no eliminados totalmente por la erosión en Cerro Largo. De espesor variable —alrededor de 90 m—, integrado por areniscas finas a medias, con raras limolitas. Son de color amarillento claro a rojizo. Presentan estratificaciones cruzadas de gran longitud, selección muy buena y granos redondeados y deslustrados, apoyando un origen eólico en dunas.

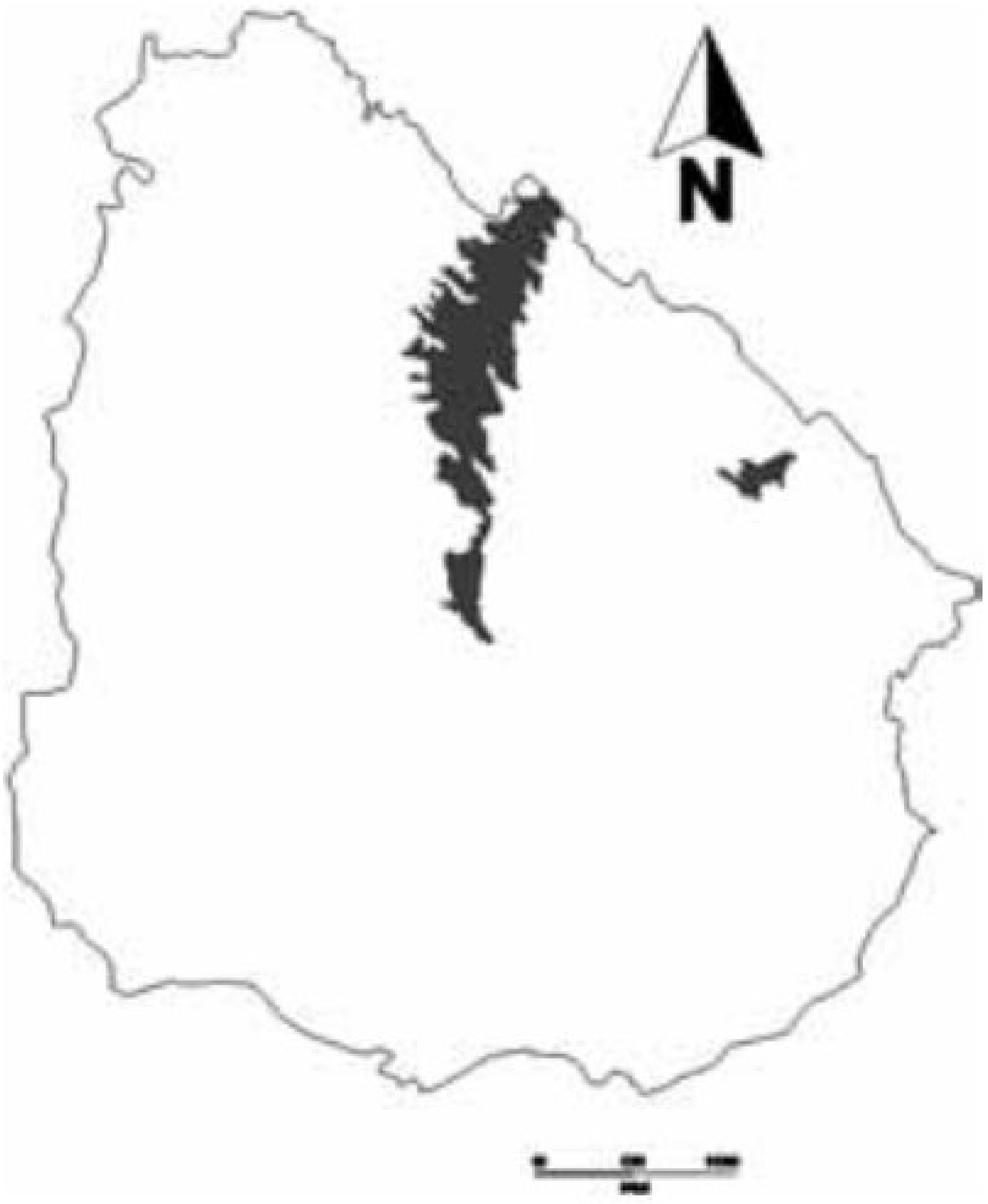


Figura 58. Área de afloramiento del Grupo Batoví Dorado

En la parte superior los depósitos eólicos fueron parcialmente invadidos por las aguas, dejando lentes de rocas arcillosas en las depresiones.

7.3.3.2. Formación Tacuarembó

Es la más espesa y extendida del grupo. El tipo de roca más abundante son las areniscas finas, a veces muy finas, bien seleccionadas, redondeadas o subangulares, feldespáticas, micáceas. El cemento es arcilloso y la coloración gris blanquecina a verdosa. Le siguen en orden de abundancia las areniscas finas a medias, bien seleccionadas, cuarzosas, micáceas, de cemento arcilloso con estratificación paralela. Presentan tonos verdosos a violáceos.

Otro término abundante lo constituyen las areniscas finas a medias, bien seleccionadas, cuarzosas, con cemento arcilloso con estratificación interna, de color rosa pálido a blancuzco. Aparecen también esporádicamente limolitas y fangolitas muscovíticas, de colores verdosos, rojizos, pardos y violáceos.

7.3.3.3. Formación Rivera

Está integrada por areniscas eólicas comprendidas entre el último depósito subacuático de la Fm. Tacuarembó y el primer derrame de basalto del grupo Arapey.

Compuesta por areniscas de grano medio, bien seleccionadas, feldespáticas, con escaso cemento arcilloso de naturaleza caolinítica. Los colores en superficie varían entre rosado, anaranjado y amarillo (pigmentados por óxidos de hierro en diverso grado de hidratación). Los granos son perfectamente redondeados y el tamaño medio es de 0,2 mm de diámetro.

7.3.4. Grupo Arapey

Es el más importante de los cuerpos basálticos formados durante el proceso geológico conocido como Magmatismo Mesozoico. Tiene un enorme desarrollo superficial (41.000 km^2), es material madre de asociaciones de suelos muy diferentes, desde muy profundos a muy superficiales, y presenta propiedades hidrogeológicas satisfactorias. Se define como integrado por la superposición de derrames basálticos con delgados niveles de areniscas eólicas interestratificadas.

Cada derrame o colada presenta estructura interna diferente desde la base hasta la cima y, aunque esas asociaciones estructurales son distintas en el detalle, en cada derrame se dan solamente dos tipos fundamentales:

Tipo 1:

- basalto vesicular rojo fácilmente meteorizable;
- basalto masivo de grano fino a muy fino;
- basalto masivo muy fino, a veces lajoso.

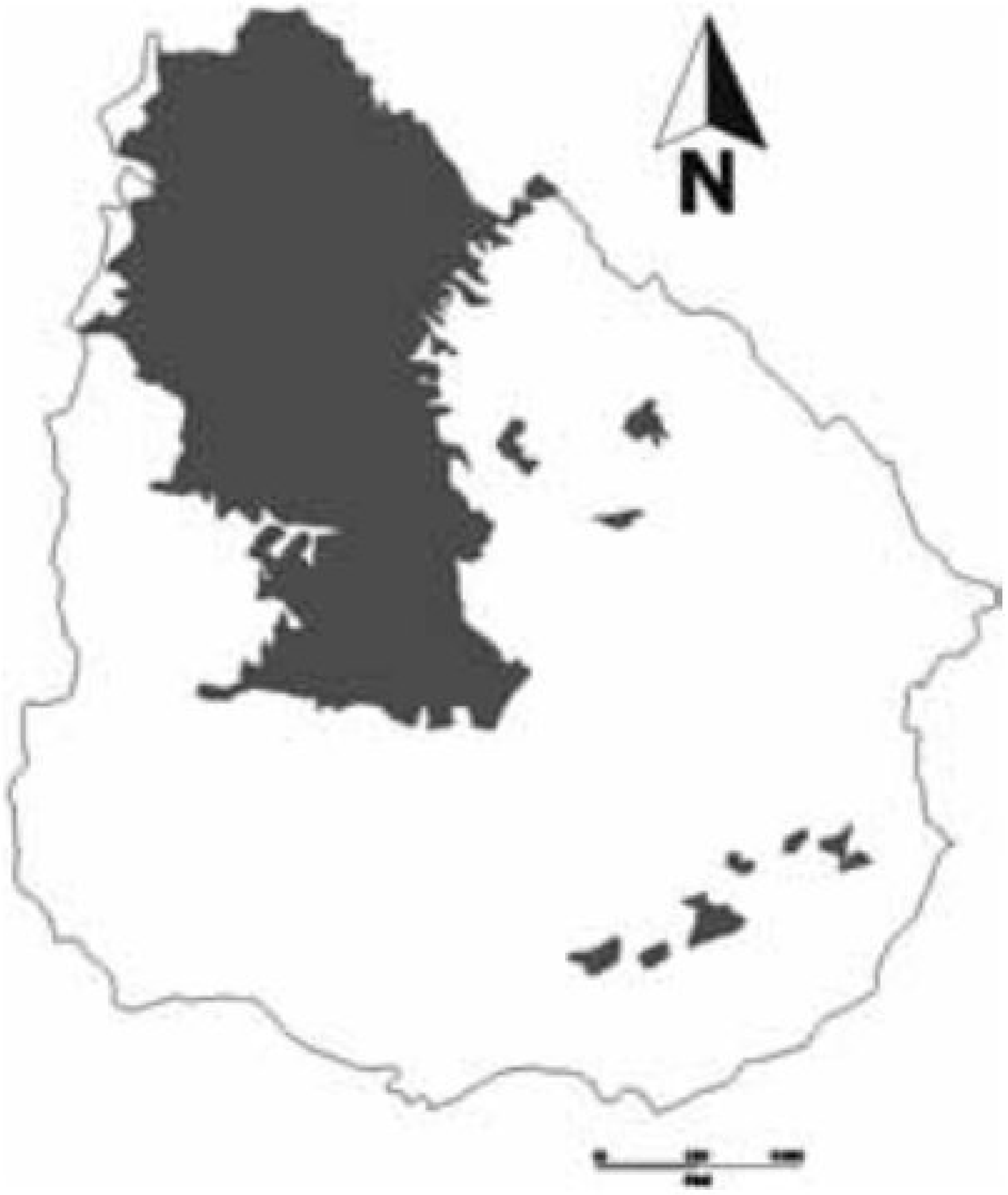


Figura 59. Área de afloramiento del Magmatismo Mesozoico

Tipo 2:

- basalto vesicular resistente a la meteorización con vacuolas tapizadas;
- basalto masivo de grano grueso, fácilmente meteorizable.

Cada colada es distinta a la vecina: tamaño de grano, composición mineralógica, contenido de oligoelementos, grado de meteorización, etc. Las rocas componentes siempre son basaltos, compuestos por labrador y augita en proporciones equivalentes. La presencia de cuarzo o de olivina produce modificaciones de la composición química entre límites no demasiado alejados.

Se reconocieron varias fallas regionales de rumbo grosero NW y una falla casi NS que provocaron variaciones de comportamiento entre los diferentes bloques por ellos limitados. Estas diferencias apoyan la idea de separar seis formaciones dentro del grupo, que probablemente tengan la misma edad, pero el criterio utilizado en su comportamiento geológico sea diferente.

7.3.4.1. Formación Los Catalanes

Se desarrolla en Artigas, posee débiles espesores de rocas basálticas (300 m) con varios afloramientos de areniscas de la Fm. Rivera. Otros rasgos distintivos son la abundancia de ágatas y amatistas y la presencia de basaltos con más del 55% de SiO_2. La estructura es casi horizontal, por lo que cada colada ocupa áreas extensas. Se han reconocido cinco coladas no siempre superpuestas.

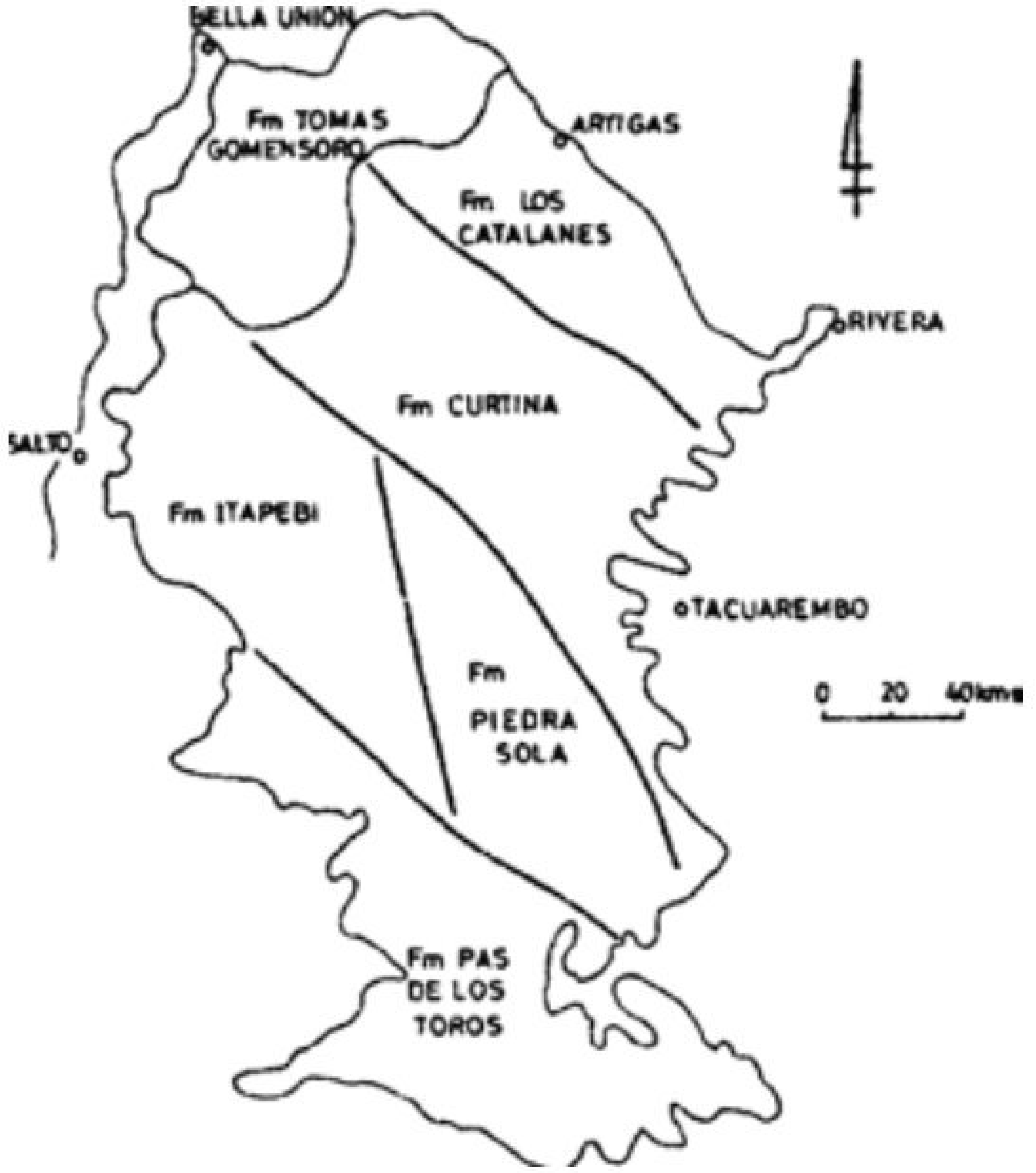

BELLA UNION
Fm TOMAS GOMENSORO
ARTIGAS
Fm LOS CATALANES
RIVERA
Fm CURTINA
SALTO
Fm ITAPEBI
TACUAREMBO
Fm PIEDRA SOLA
0 20 40kms
Fm PAS DE LOS TOROS

Figura 60. Formaciones del grupo Arapey

7.3.4.2. Formación Curtina

Se desarrolla al W y NW de la ciudad de Tacuarembó. Presenta como característica un buzamiento regional de 0,5 a 0,8° al NW, afloramientos de basalto de grano muy fino y rellenos silíceos frecuentes. Son comunes los niveles de areniscas entre coladas y el buzamiento, junto con el afloramiento de basaltos poco meteorizables. Por su alto tenor en sílice generan un fuerte relieve, un desarrollo de suelos muy superficiales y un área reducida de afloramiento de cada una de las coladas superpuestas.

7.3.4.3. Formación Piedra Sola

Presenta estructuras casi horizontales con extensas áreas de afloramiento de cada una de las nueve coladas superpuestas individualizadas. Algunas coladas son porfíricas, a veces contienen olivina y es frecuente que los niveles vacuolares sean más resistentes a la meteorización que las rocas masivas.

7.3.4.4. Formación Paso de los Toros

Se ubica al sur del área basáltica. Se caracteriza por un relieve suavemente ondulado a plano. Los derrames son poco potentes (10-20 m) y buzan menos de 1° al sw. Las rocas son porfíricas o contienen olivina, lo que genera gran facilidad de meteorización. Los niveles vesiculares contienen exclusivamente ceolitas. Aparecen en todo el bloque no menos de ocho derrames superpuestos en un total de once coladas, donde el espesor de cada una aumenta hacia el nw.

7.3.4.5. Formación Tomás Gomensoro

Ocupa el extremo nw del área basáltica. Se identifica por una topografía extremadamente plana, con intensos fenómenos de meteorización. Los basaltos son de grano excepcionalmente grueso, pudiendo la plagioclasa alcanzar tres milímetros de longitud. Cada colada es poco espesa (5-15 m) y son raros los niveles de areniscas intertrapianas.

7.3.4.6. Formación Itapebí

Presenta superficie plana, suavemente ondulada con estructura horizontal, conteniendo 27 derrames superpuestos de 30 a 40 metros de espesor individual, con un espesor total de 900 metros. Afloran tres tipos de rocas: los basaltos masivos, de grano medio a grueso (dominantes); los basaltos vacuolares, resistentes a la meteorización, y los lentes de areniscas eólicas silicificadas. En esta zona la erosión es mínima y la meteorización ha producido suelos de mucho espesor porque es un bloque que se está hundiendo con relación al resto del área basáltica.

Esta estructura geológica en bloques de diferente espesor de basalto, separados por fallas aún activas, permite movimientos verticales para lograr equilibrio isostático. Los bloques que se levantan permiten que la erosión domine sobre la meteorización y viceversa. Al agregarse el tipo de roca aflorante se producen zonas con suelos profundos de gran fertilidad natural y zonas de suelos superficiales y muy superficiales.

7.3.5. Grupo Lascano

Aflora en porciones aisladas en la periferia de la fosa tectónica, como relictos de los derrames predecesores del hundimiento (sierra San Miguel, de los Ajos, etc.), y en los alrededores de la localidad de Lascano.

Bossi y Navarro (1991) proponen denominar grupo Lascano al conjunto de lavas derramadas en estrecha asociación con el hundimiento de las fosas tectónicas pericratónicas jurásicas del s y e del Uruguay.

Queda integrado de la siguiente forma:

- Sienitas del cerro Vicheo,
- Fm. Arequita;
- Fm. Mariscala;
- Dacitas de Río Branco.

Las sienitas del cerro Vicheo y las dacitas de Río Branco ocupan áreas insignificantes y no presentan importancia agronómica.

7.3.5.1. Formación Mariscala

Las rocas más abundantes son basaltos con frecuentes vesículas en todo el espesor de cada colada. Son rocas microgranudas de color gris oscuro, cuando frescas, y de color pardo rojizo por meteorización. Las vesículas, de 5 a 25 mm, están rellenas de minerales muy variados, pero los más frecuentes son las cloritas, ceolitas, calcedonia, cuarzo y calcita. Estos basaltos están compuestos por labrador y augita, pero frecuentemente han sido transformados en una mezcla de albita y ceolitas (de la plagioclasa) y celadonita = illita Fe^{++} (del piroxeno). Como resultado de su composición original, ya poco resistente a la meteorización en clima templado, y de los procesos hidrotermales que generaron las rocas arriba descritas, las mismas presentan enorme facilidad para dar suelos profundos (Valle Fuentes, por ejemplo).

7.3.5.2. Formación Arequita

Incluye los derrames de riolita apoyados sobre basaltos de la Fm. Mariscala. El cerro Arequita, tomado como localidad tipo, está compuesto por tres derrames superpuestos con niveles brechosos en los contactos. Las riolitas son porfíricas —con fenocristales milimétricos de cuarzo y sanidina—, resistentes a la meteorización y determinan cerros prominentes con densa vegetación arbustiva sin interés agronómico, aunque son rocas con contenido relativamente elevado de fosfatos que se concentran en los niveles de tufos volcánicos entre derrame y derrame. Estos son fácilmente meteorizables porque son porosos y poco tenaces. Al disolverse los fosfatos por acción de las aguas meteóricas, son arrastrados desde el cerro hacia el valle con suelos espesos y absorbidos por las esmectitas del perfil edáfico.

7.3.6. Fosas Tectónicas

Terminado el vulcanismo, y simultáneamente con él, se generan fosas tectónicas. De ellas, dos son de importancia: la del Santa Lucía (ubicada en el Terreno Tandilia) y la de la laguna Merín (ubicada en el Terreno Cuchilla Dionisio). A continuación se presenta una breve descripción de cada una.

7.3.6.1. Fosa Tectónica del Santa Lucía

Fue formada en el período Jurásico, inmediatamente después de los primeros derrames de lavas basálticas de la Fm. Mariscala.

Los esfuerzos asociados a la apertura del océano Atlántico comenzaron hace 150 Ma y se asociaron a derrames de lavas y hundimientos de bloques entre fallas, definiendo fosas tectónicas. Una de ellas es la de Santa Lucía, que se desarrolla con rumbo general N70E. Los bordes están separados unos 45 km entre sí y abarca la mitad sur de San José y la mitad norte de Canelones.

En el E afloran basaltos de la Fm. Mariscala y sedimentos de la Fm. Migues. En la parte central afloran extensamente las formaciones del Cretácico Superior (Mercedes y Asencio), la Fm. Fray Bentos y el miembro San Bautista de la Fm Raigón. Hacia el W, la unidad dominante es la Fm. Libertad, apoyada sobre el miembro San Bautista de la Fm. Raigón y, en algunos casos, directamente sobre el miembro Mauricio.

7.3.6.2. Fosa tectónica de la laguna Merín

La secuencia de fenómenos ocurridos es similar a la fosa del Santa Lucía, pues también es una fosa tectónica que determinó lo esencial del proceso evolutivo. Existieron, sin embargo, algunas diferencias:

- El magmatismo predecesor y simultáneo a las primeras etapas de hundimiento de los grandes bloques crustales no fue solo basáltico, sino que contienen términos más ácidos, incluso riolitas.
- Dicho magmatismo adquirió espesores de más de 1000 m, cuando en la fosa tectónica de Santa Lucía no superó 100 m.
- El proceso de hundimiento fue continuo y regular desde el comienzo; no hay etapas erosivas intermedias, hay espesos depósitos marinos por conexión con el océano y la estructura general es groseramente horizontal.
- El hundimiento siguió hasta 5000 años, determinando superficies excepcionalmente planas con mínimos procesos erosivos causados solamente por los cursos de agua.

Esta evolución ha determinado que existan en profundidad espesores considerables de la Fm. Migues (150 m), Fray Bentos (80 m), Chuy (40 m), pero que en superficie afloren solamente rocas del grupo Lascano (descrito anteriormente) y de la Fm. Dolores.

7.3.7. Rocas Sedimentarias Cretácicas
(Ford: 1988; Ford y Gancio: 1990; Bossi y Navarro: 1991)

En Uruguay pueden distinguirse dos grandes asociaciones litológicas durante este período:

- Cretácico inferior 120-110 Ma: Fm. Migues;
- Cretácico superior 90-60 Ma Grupo Paysandú (Fm. Asencio, Fm. Mercedes, Fm. Guichón).

7.3.7.1. Formación Migues

Se ha depositado en cuencas intermontanas y su extensión se limita a las fosas tectónicas del E y SE del país.

En la fosa de Santa Lucía quedó un pilar central sin hundir que pasa por debajo de las localidades de Libertad, Canelones y Santa Rosa. Dentro del área de afloramiento de la Fm. Migues dominan netamente las rocas de grano fino: areniscas finas, limolitas y lutitas, todas caracterizadas por cierto contenido de mica blanca detrítica y un color borra de vino muy particular. Las rocas de grano más grueso se limitan a los bordes del área de la fosa o aparecen en profundidad respecto a la actual superficie de erosión. Estas rocas afloran solamente en los alrededores de las localidades de Migues y Montes (Canelones), en el borde oriental de la fosa, debido al recubrimiento de los sedimentos más jóvenes, que solo desapareció en el extremo oriental de la fosa, porque ahora está en proceso de levantamiento para recomponer el equilibrio isostático.

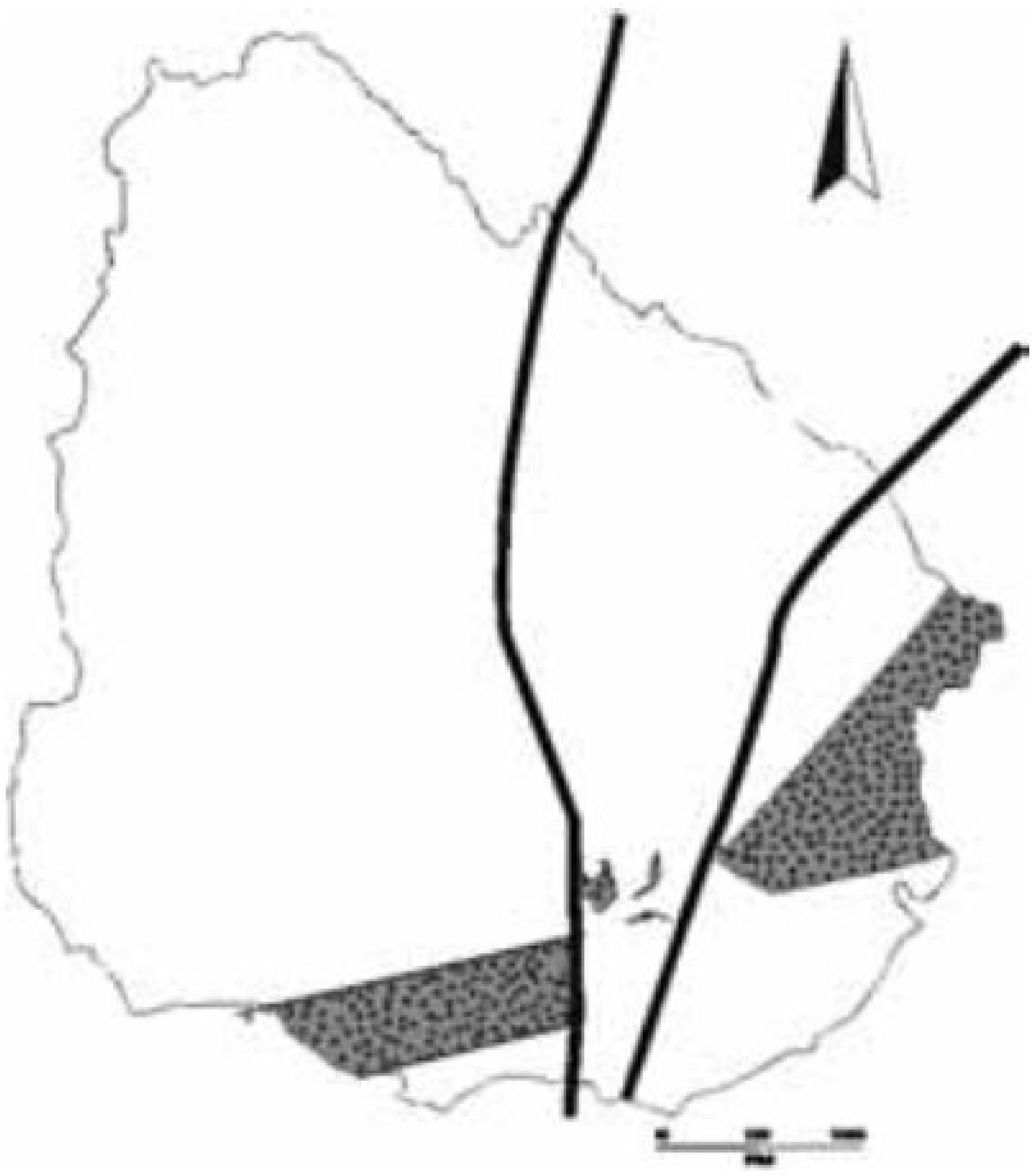


Figura 61. Área de depósito de la Fm. Migues

7.3.7.2. Grupo Paysandú

Reúne rocas sedimentarias, principalmente detríticas, que se depositaron durante el cretácico superior con la siguiente sucesión:

- En la cima, areniscas de la Fm. Asencio.
- En la parte media, areniscas conglomerádicas, areniscas, lutitas y calizas de la Fm. Mercedes.
- En la base, areniscas y conglomerados de la Fm. Guichón.

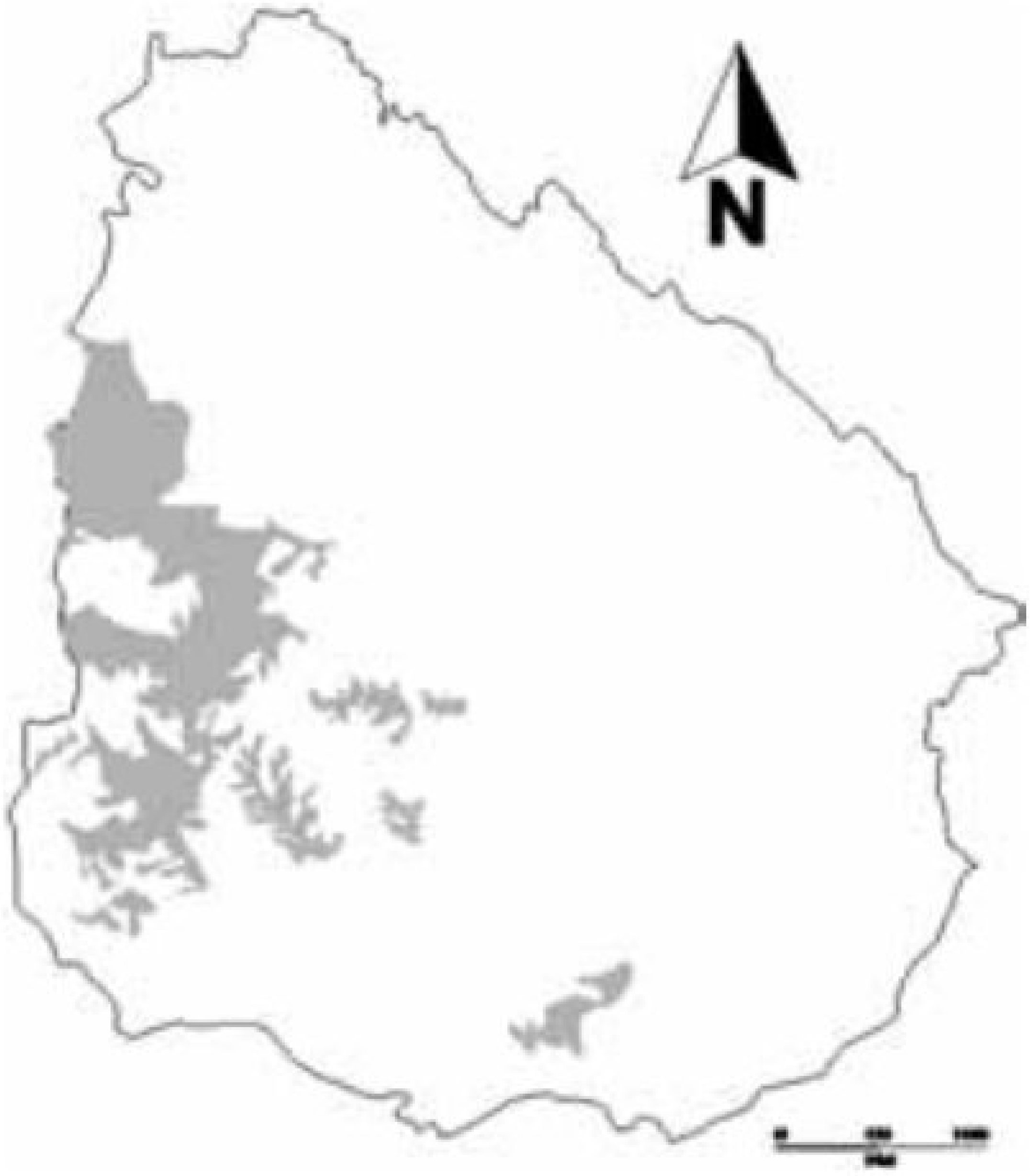


Figura 62. Área de afloramiento del Grupo Paysandú

Formación Guichón: está integrada por dos términos litológicos principales: areniscas finas a medias de cemento arcilloso que predomina en toda el área de afloramiento, y areniscas conglomerádicas a conglomerados, generalmente de cemento silíceo.

Las areniscas son de color rojizo, grano fino algo irregular pero sin guijarros. Los granos de cuarzo son redondeados y deslustrados. El contenido en cemento arcilloso siempre es elevado y la roca ofrece una resistencia jabonosa al golpe del martillo.

Es frecuente la presencia de estratificaciones cruzadas y diagonales. También contienen delgados y esporádicos lentes de carbonatos de calcio. Se interestratifican con delgados lentes calcáreos y niveles conglomerádicos, donde los lechos calcáreos parecen encontrarse con igual frecuencia en todo el perfil, mientras que los niveles conglomerádicos son frecuentes en la mitad superior. Estos niveles conglomerádicos, de 1 a 2 m de espesor, contienen exclusivamente clastos de calcedonia, ágata y cuarzo provenientes de las geodas basálticas, indicando procedencia de material desde el NE y E.

Aflora extensamente en la mitad occidental de Paysandú y posee espesor de hasta 100 m. Determina paisajes quebrados con cornisas angulosas generadas por los niveles de silicificación.

Formación Mercedes: la principal zona de afloramiento se encuentra en Río Negro. Mucho menos extendida aparece en Paysandú, Soriano, Durazno, Colonia, Tacuarembó y Canelones.

En el cerro Camundá (exposición superficial de la Fm.) se observan tres litologías fundamentales, aunque de espesores y posiciones estratigráficas variables:

a. Areniscas conglomerádicas, conglomerados areniscosos y conglomerados; los clastos son siempre de origen granítico o pegmatítico, indicando proveniencia desde el S-SE.

b. Areniscas de grano fino a medio, de color blancuzco, normalmente cementadas por $CaCO_3$.
c. Lutitas arenosas, montmorilloníticas, que en forma gradual, hacia la cima y al E van incrementando el contenido en calcáreo hasta transformarse en verdaderas calizas, masivas, tenaces, color té con leche, parcialmente silicificadas.

Una de las características es poseer siempre niveles de areniscas conglomerádicas, conglomerados o areniscas muy gruesas. Son siempre feldespáticas y los clastos, redondeados, siempre compuestos por rocas del basamento cristalino: pegmatitas, granitos y cuarcitas. Frecuente estratificación cruzada. Hacia la periferia estas secuencias arenosas se transforman en calizas que, cuando se apoyan en el basalto, están totalmente silicificadas; cuando se apoyan sobre areniscas se infiltran aguas con Si, se silicifican las areniscas y las calizas quedan casi intactas.

Formación Asencio: se desarrolla ampliamente en Soriano, Río Negro, Paysandú, Durazno, Flores, Florida y Canelones. Está compuesta por areniscas blancas y rosado pálido, de grano fino, redondeado, con cemento arcilloso illítico o calcáreo. Son rocas macizas y friables. Un rasgo secundario, pero estrechamente asociado a esta formación, es el fenómeno de ferrificación que sufrió luego de su depósito. La ferrificación se manifiesta de tres formas diferentes, pero asociadas y de evolución gradual. En la base, los óxidos férricos rojo ladrillo rellenan fracturas subperpendiculares y constituyen el 10-20% del total de la roca. En la parte media se definen columnas de 0,5-0,8m de diámetro y varios de altura, separadas entre 2 y 5 m entre sí. En la cima se forma un carapacho continuo de roca intensamente ferrificada, compuesta por granos de arena cuarzosa redondeada, cementados por óxidos de hierro rojos. El cemento arcilloso de las areniscas blancas friables había sido determinado como illita en varios afloramientos, pero presenta dominio de caolinita en la parte superior del perfil de un paleosuelo de casi 10 m de espesor en condiciones climáticas tropicales, para permitir la monosialitización (arcillas tipo 1:1).

Las corazas de ferrificación se habrían formado por migración del hierro desde la cima de las paleocolinas a la zona de descarga de las aguas freáticas de la ladera.

7.3.8. Sedimentos Cenozoicos

7.3.8.1. Formación Fray Bentos

Las rocas predominantes son limosas o areniscas muy finas, con contenido variable de arcilla, arena fina y calcáreo. Desde el punto de vista agronómico presentan la importancia de generar los mejores suelos del país en las zonas de Cololó y Bequeló, pero su distribución es muy extensa. La sección tipo se ubica en las barrancas de los alrededores de Fray Bentos. Aquí las rocas dominantes son areniscas finas, limolitas, loess, generalmente bien seleccionados y con 20% de $CaCO_3$ en promedio. Son rocas macizas, de color rosado anaranjado característico y constante. Se pueden reconocer cuatro tipos de rocas principales:

- En la base, brechas englobando fragmentos irregulares de los materiales subyacentes (lodolitas tilloides, poco frecuentes).

- Niveles arcillosos, también muy raros, conocidos solo en Paso Cuello.
- Loess macizos de típico color pardo anaranjado, que representa uno de los tipos de roca más frecuentes de la formación.
- Areniscas finas, también pardo anaranjadas, con estratificación cruzada neta o difícil de observar, también roca muy frecuente.

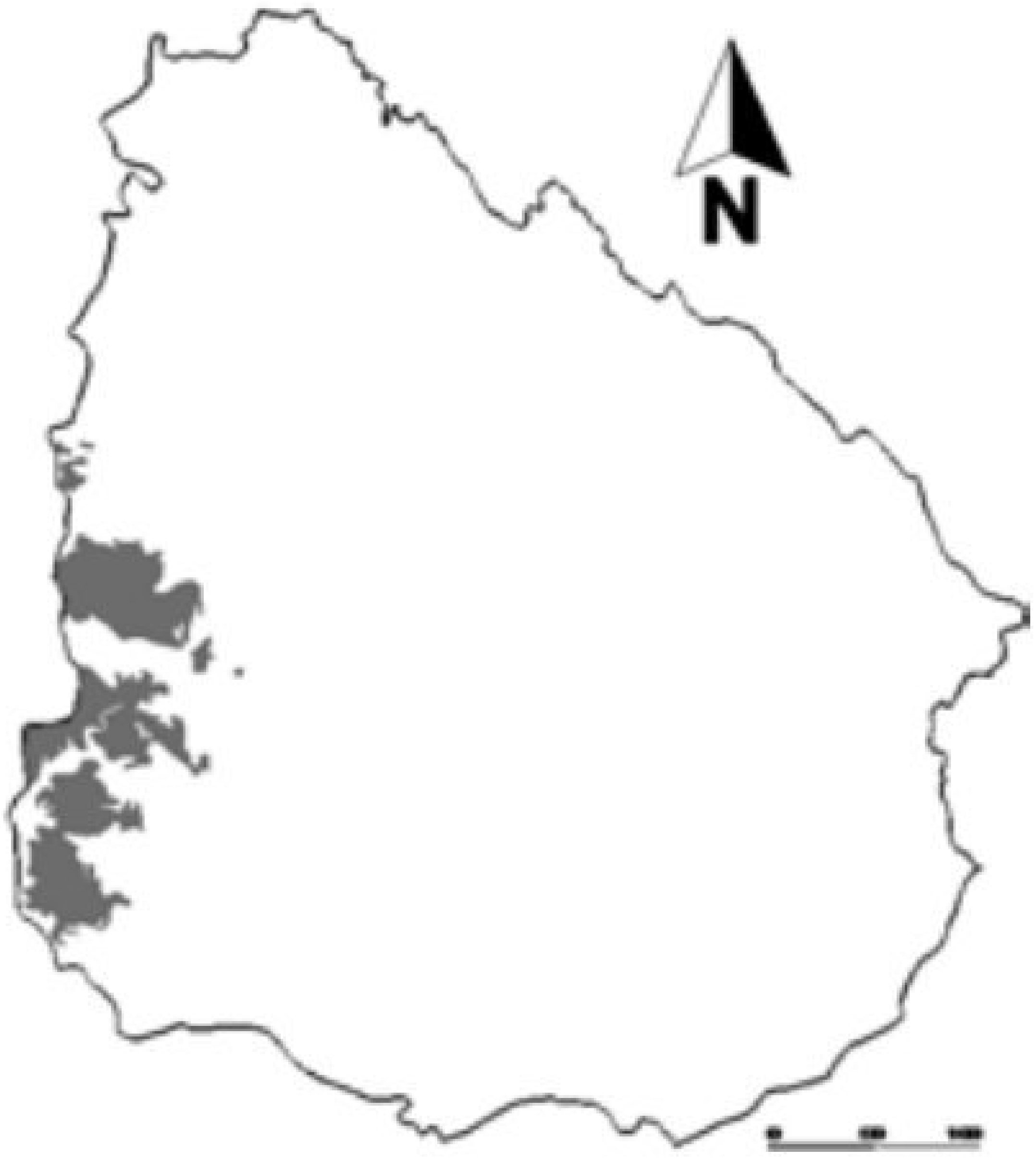


Figura 63. Área de afloramiento de la Fm. Fray Bentos

El factor unificante de esta formación es el típico color pardo anaranjado (o rosado) de todas las rocas integrantes. Aunque fueron varias las rocas formadas en las condiciones semiáridas que reinaron durante el depósito de la Fm. Fray Bentos, los loess y las areniscas muy finas, calcáreos y tenaces, dominan netamente en la mayoría de los afloramientos.

7.3.8.2. Formación Camacho

Es el resultado de un depósito marino terciario que aflora escasamente en el w del departamento de Colonia (Punta Gorda, Calera de las Huérfanas). En el perfil de Punta Gorda es donde se presenta la mejor exposición:

- Tres metros de lumaquelas muy tenaces, resistentes a la meteorización, que forman una importante cornisa.
- De diez a quince metros de arenas de diversa granulometría, pero normalmente muy bien seleccionadas, con el 90% de los granos de aproximadamente 0,1 mm.
- Dos metros de arcillas de color gris verdoso, compuestas por illita que contiene Fe^{++} en la capa octaédrica.

En el Chuy esta formación mantiene el espesor de alrededor de 20 m, pero se encuentra a profundidades entre 120 y 150 m en las perforaciones del área.

7.3.8.3. Formación Salto

Esta unidad estratigráfica ocupa las partes altas de una faja de más de 200 km en sentido NS y unos 30 km en sentido EW, contra la margen izquierda del río Uruguay, desde Bella Unión hasta Bellaco (Río Negro). Esta formación comienza con un nivel de fangolitas gris verdosas (1 a 2 m) seguidas por areniscas y conglomerados que se interestratifican con estructuras lenticulares. Las areniscas constituyen el tipo de roca más importante, son de grano medio a fino con buena selección, granos bien redondeados, muy cuarzosa (5% de feldespatos). Están muy poco cementadas y son de color rojo intenso porque los granos están cubiertos de una pátina de óxidos de hierro. Presentan esporádicos niveles totalmente silicificados (Bossi y Navarro, 1991).

7.3.8.4. Formación Raigón (Goso y Bossi, 1966)

La mejor exposición se encuentra en las barrancas del balneario Kiyú donde se presenta el siguiente perfil:

- Roca limo-arenosa con desarrollo de caliche (paleosuelo).
- Areniscas feldespáticas de grano grueso con estratificación cruzada.
- Areniscas finas y medias.
- Arcillas verdes lenticulares.
- Areniscas finas con lentes de pelitas verdes.

Un nivel de loess naranja resistente a la meteorización fue considerado a su vez como integrante de la Fm. Libertad. Luego se logró demostrar que ese limo naranja resistente presentaba pasaje concordante a los limos con caliche y totalmente discordante con las lodolitas friables masivas pardas de la Fm. Libertad. Por lo tanto, no pertenecía a la base de la Fm. Libertad, sino que era el techo de la Fm. Raigón. Por lo que se hizo necesario redefinir a la Fm. Raigón como compuesta de la cima a la base por:

- loess naranja poroso resistente.
- Areniscas y conglomerados con lentes de pelitas.
- Pelitas verdes y grises.

En el sur de San José el espesor de los limos superiores es muy reducido. Las areniscas y conglomerados alcanzan espesores de hasta 25 m, y las pelitas verdes y grises cifran en el orden de los 10 m. Sin embargo, en la zona de Delta del Tigre el perfil geológico es totalmente diferente. Las pelitas gris-verde de la base son escasas o inexistentes, los niveles conglomerádicos no se han desarrollado y, en cambio, los loess naranjas tenaces adquieren espesores frecuentes del orden de los 10 m.

Podría así diferenciarse en tres unidades litoestratigráficas de menor jerarquía que, de la cima a la base, son:

- Miembro San Bautista: loess naranja.
- Miembro Mauricio: conglomerados y areniscas.
- Miembro Kiyú: pelitas grises.

7.3.8.5. Formación Libertad

Definida por Goso (1965) para denominar las rocas limosas, masivas, friables, de color pardo. En la definición original se incluían en la base los limos naranjas tenaces, porosos, que actualmente se definen como miembro San Bautista de la Fm. Raigón. La definición actual incluye solamente las lodolitas masivas pardas, friables, con arena gruesa dispersa y constante frecuencia de concreciones de $CaCO_3$. Minúsculos cristales de yeso están también omnipresentes. La composición granulométrica promedio, a partir de treinta análisis en San José, Colonia y Montevideo, es la siguiente:

- Fracción arena (granos > 1 mm) 2 %.
- Fracción limo (5-50 micras) 45±7%.
- Fracción arcilla (<5 micras) 45±6%.

La composición mineralógica de la fracción arcilla consiste, principalmente, en illita dominante, interestratificados y montmorillonita. Esta formación reviste importancia agronómica por la calidad de los suelos generados sobre ella.

7.3.8.6. Formación Dolores

Compuesta por rocas limosas de color pardo con manchas verdosas de forma irregular. Las rocas son friables y carentes de estratificación. Esta formación tiene una enorme importancia agronómica ya que, sobre los suelos desarrollados en estos limos, se producen los principales cultivos de arroz.

En la cuenca de la Laguna Merín estos sedimentos tienen un espesor variable entre 14-20 m.

7.3.8.7. Formación Chuy

Debajo de las rocas limosas de la Fm. Dolores existen sedimentos que muestran depósitos continentales y marinos.

Perforación Rincón de Gabito:

- 0-10 m Fm. Dolores.
- 10-40 m sedimentos marinos.
- 40-66 m sedimentos continentales, comenzando por albufera.
- 66-77 m sedimentos marinos.
- 77-79 m sedimentos litorales.

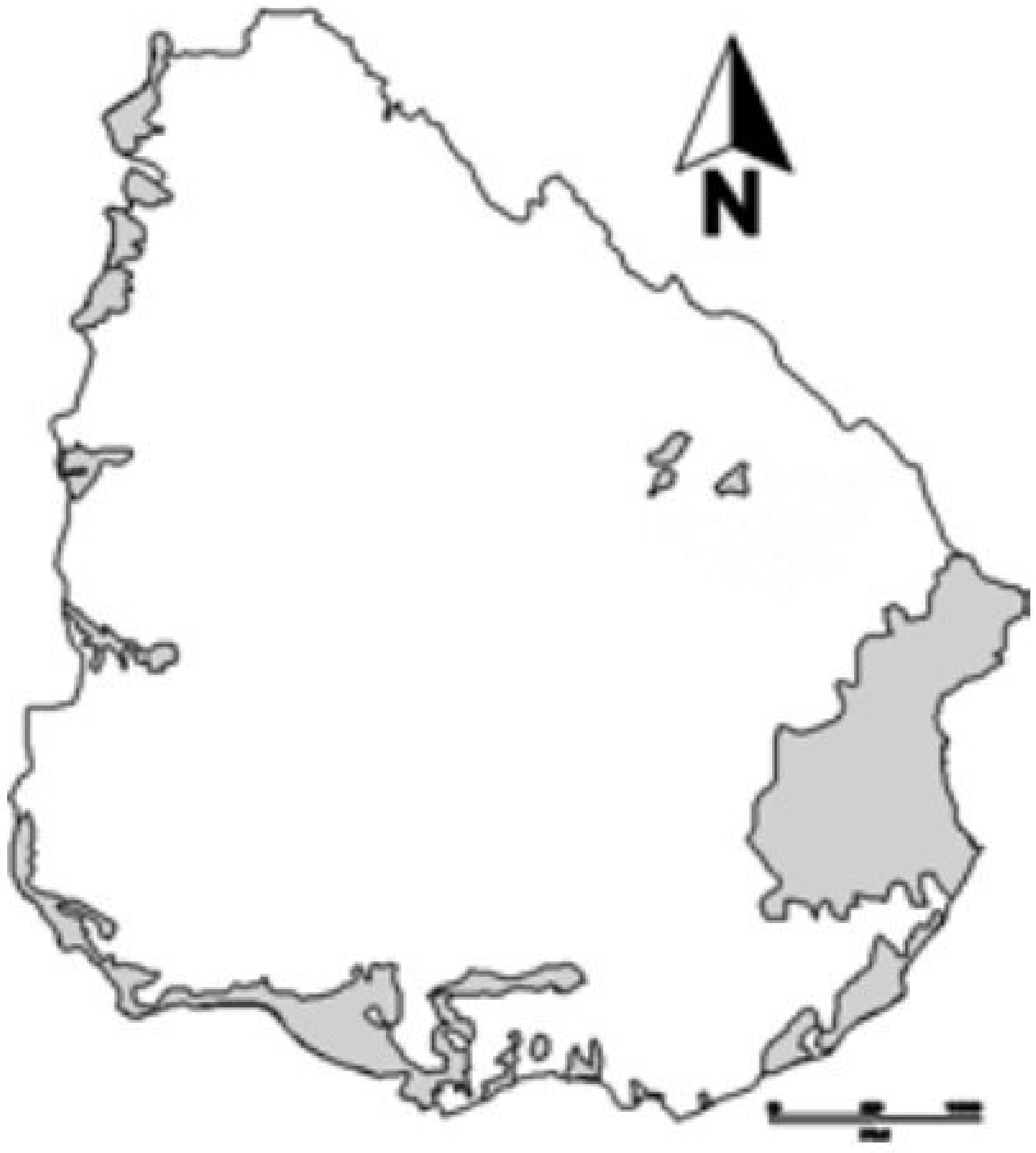


Figura 64. Área de afloramiento de los Sedimentos Cenozoicos

7.4. Ejercicios

1. En el mapa de Uruguay adjunto dibuje la distribución de las rocas predevonianas: incluyen Arqueano, Proterozoico y Cámbrico. Defina la escala del mapa.
2. Trace el Lineamiento Sarandí del Yí-Piriápolis (LSYP) para dividir el Terreno ________________ al W de los Terrenos _________ y ________________ al E.
3. Indique las principales unidades reconocidas en el Terreno Piedra Alta con su ubicación y nombre.
4. Indique la zona de afloramientos con rocas carbonáticas metamórficas; describa a qué Terreno pertenecen. Trace el borde oriental de las calizas que es determinado por la Zona de Cizalla de Sierra Ballena (ZCSB).
5. El Grupo Durazno está compuesto por tres formaciones: Cerrezuelo, Cordobés y La Paloma. Indique cuál de ellas contiene areniscas conglomerádicas con abundantes feldespatos.
6. Realice el perfil de una perforación que se ubique en la localidad de La Paloma (Durazno) hasta una profundidad de 300 metros.
7. En el mapa de Uruguay adjunto dibuje la zona de afloramientos de las formaciones San Gregorio y Tres Islas por separado. ¿En qué condiciones climáticas se depositó cada una? ¿Cómo se sabe? Describa someramente que es una arcosa.
8. Agregue al dibujo anterior la zona de afloramientos de la formación inmediatamente más joven que la Fm. Tres Islas. Indique la secuencia estratigráfica del Gondwana Sedimentario incluyendo Formaciones y Grupos.

9. Dibuje, en otro mapa de Uruguay, la distribución del magmatismo Mesozoico. Ubique las zonas de suelos superficiales. ¿Qué tipo de basalto domina en el área de litosoles?
10. Agregue al dibujo la zona de afloramiento del Grupo Batoví Dorado. Indique que formaciones lo integran y colóquelas en orden estratigráfico (la más joven arriba).
11. Realice un corte geológico desde la ciudad de Tacuarembó a Salto con escala horizontal 1/1.000.000 y escala vertical 1/10.000.
12. Construya la columna estratigráfica completa del Gondwana Sedimentario. Señale la litología dominante de cada formación y algunos rasgos distintivos.
13. Ubique, en una de las cartas anteriores, las fosas tectónicas de Santa Lucía y Laguna Merín.
14. ¿Cuáles son las rocas sedimentarias aflorantes en la Fosa de la Laguna Merín? ¿A qué se debe que los suelos tengan tan poca pendiente y puedan utilizarse, por ejemplo, para el cultivo del arroz?
15. En la Fosa de Santa Lucía las formaciones y litologías sedimentarias aflorantes son mucho más variadas. Observando la carta geológica de su mesa, describa todas las formaciones aflorantes en orden estratigráfico desde la más joven a la más antigua. ¿Por qué las unidades más jóvenes afloran al oeste y las más antiguas al este?
16. Realice un corte geológico con dirección NS de Montevideo a Florida hasta 300 m de profundidad. Utilice escala horizontal 1/1.000.000 y escala vertical 1/200.000.
17. Indique en uno de los mapas disponibles la distribución del Grupo Paysandú. Señale a qué edad pertenece y por qué se sabe que la Fm. Guichón proviene del noreste y la Fm. Mercedes del sureste.
18. Describa en detalle el contacto entre las formaciones cretácicas y las terciarias. Realice un perfil ilustrativo.
19. Señale prolijamente las áreas de afloramiento de la Fm. Fray Bentos.
20. Realice un perfil de la Fm. Raigón incluyendo su división de miembros.
21. Describa en sus rasgos esenciales las distintas rocas limosas conocidas en el período Cenozoico en Uruguay. Señale su distribución regional en un mapa de Uruguay.
22. Realice la columna estratigráfica completa del Cenozoico de Uruguay separando las unidades terciarias y cuaternarias.

Bibliografía recomendada:

BOSSI, Jorge (2007), *Regiones geológicas del Uruguay*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

BOSSI, Jorge, Rosa NAVARRO (1991), *Geología del Uruguay*. Montevideo: Universidad de la República, Vol. 1 y 2.

BOSSI, Jorge, Alejandro SCHIPILOV (2007), *Rocas ígneas básicas del Uruguay*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

FORD, I. (1988), *Asociación caolinita-montmorillonita en perfiles tipo de la formación Asencio. Primera Reunión de Geología Uruguaya*. Salto: 47-49.

FORD, I, F. GANCIO (1990), *Asociación caolinita-montmorillonita en un paleosuelo del Terciario Inferior del Uruguay (Fm. Asencio)*. Montevideo: Bol. Inv. Facultad de Agronomía.

ORTIZ, Alejandra (2009), *Glosario de geología e hidrogeología*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

VEROSLAVSKY, Gerardo, Martín UBILLA, Sergio MARTÍNEZ (ed.) (2006), *Cuencas sedimentarias del Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales. Paleozoico*. Montevideo: DIRAC.

———— (2004), *Cuencas sedimentarias del Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales. Cenozoico*. Montevideo: DIRAC.

———— (2003), *Cuencas sedimentarias del Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales. Mesozoico. Montevideo*. DIRAC.

CAPÍTULO 8

Hidrogeología

8.1. Introducción

La hidrogeología es la aplicación de conceptos hidráulicos a una estructura geológica para extraer de ella aguas subterráneas aptas para determinado destino. Para el tratamiento de este manual las aguas deben ser *potables* para uso humano, tambo y lavado de frutas y verduras; *blandas* (poco contenido de Ca^{++} y Mg^{++}) para riego por goteo, o *poco salinas* para riego de invernáculo.

En la producción agropecuaria es un conocimiento necesario. Su manejo adecuado permite obtener mejor calidad de vida y mejor rendimiento por cada hectárea.

Los criterios y técnicas a emplear dependen de la naturaleza del subsuelo, de las estructuras y tipos de rocas —casi exclusivamente—, porque en Uruguay desde hace cientos de años el clima es templado y las precipitaciones se producen todo el año sin estación seca (Isohigro).

El agua subterránea es un recurso natural de máxima importancia en el campo de la agronomía por ser la única fuente de agua potable a costos reducidos en la mayor parte del territorio nacional.

Por otra parte, el ingeniero agrónomo es el único profesional capaz de generar la conciencia nacional de asegurar, con aguas superficiales y subterráneas, la cantidad imprescindible para la operación rentable del establecimiento. En efecto, sabiendo la cantidad de agua necesaria y la disponibilidad de aguas superficiales, puede aconsejar con certeza si es necesario disponer o no de aguas subterráneas. Para ello debe poseer la información sobre los recursos hidrogeológicos de cada zona del país, siendo imprescindible conocer la naturaleza del subsuelo. Ayudado por PRENADER (<www.prenader.gub.uy>), Heinzen *et al.* (2003), la *Memoria explicativa de la carta hidrogeológica a escala 1/2.000.000* (1986) y por datos del vecindario, se puede estimar la posibilidad de explotación, volumen y calidad de agua subterránea en la zona.

Esta función es de un valor incalculable, dado que los ingenieros agrónomos son asesores cercanos de los productores y pueden orientarlos con idoneidad sobre el más eficaz mecanismo para proveerse del agua necesaria en casos de sequía o de intensificación de la producción.

Lo único que no debe hacer un ingeniero agrónomo no especializado en hidrogeología es marcar el lugar a perforar, pues no está capacitado para ello. Está limitado a tomar la decisión de conseguir o no agua subterránea. Hoy existen empresas que incluso ubican el lugar y cobran por metro cúbico de agua alumbrada por hora.

El aprendizaje de conceptos hidrogeológicos permitirá, sobre todo, controlar el uso correcto de agua de la perforación una vez entregado el pozo, obtener análisis del agua, asegurar el caudal controlando el bombeo prolongado, etc.

En resumen, la función del ingeniero agrónomo en el tema hidrogeología es variada y de máxima importancia:

- Saber cuando acudir al recurso de agua subterránea.
- Conocer los antecedentes de la zona para estimar probabilidades.
- Controlar la realización del pozo, asegurando sello sanitario y caudal.
- Estimar el costo del metro cúbico.
- Asegurar un manejo adecuado, sin sobreexplotación, cuando se está en producción.
- No intervenir en la determinación del lugar exacto donde realizar la perforación.

8.2. Acuíferos

Son unidades geológicas capaces de almacenar y ceder agua con facilidad. Se clasifican en *porosos*, *fracturados* y *kársticos*. Los acuíferos porosos se desarrollan en rocas sedimentarias; los fracturados se encuentran en rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias cementadas y los kársticos acumulan agua en cavernas generadas por disolución de calcáreos.

8.2.1. Acuífero poroso

Se desarrolla en rocas que poseen porosidad primaria (rocas sedimentarias detríticas) por lo que, los acuíferos porosos, están conformados por estratos o formaciones geológicas sedimentarias de tipo detrítico. Su desarrollo espacial es básicamente horizontal o subhorizontal.

8.2.1.1. Conceptos básicos de los acuíferos porosos

Porosidad

La porosidad es el porcentaje de huecos dejados por los granos componentes del sedimento detrítico.

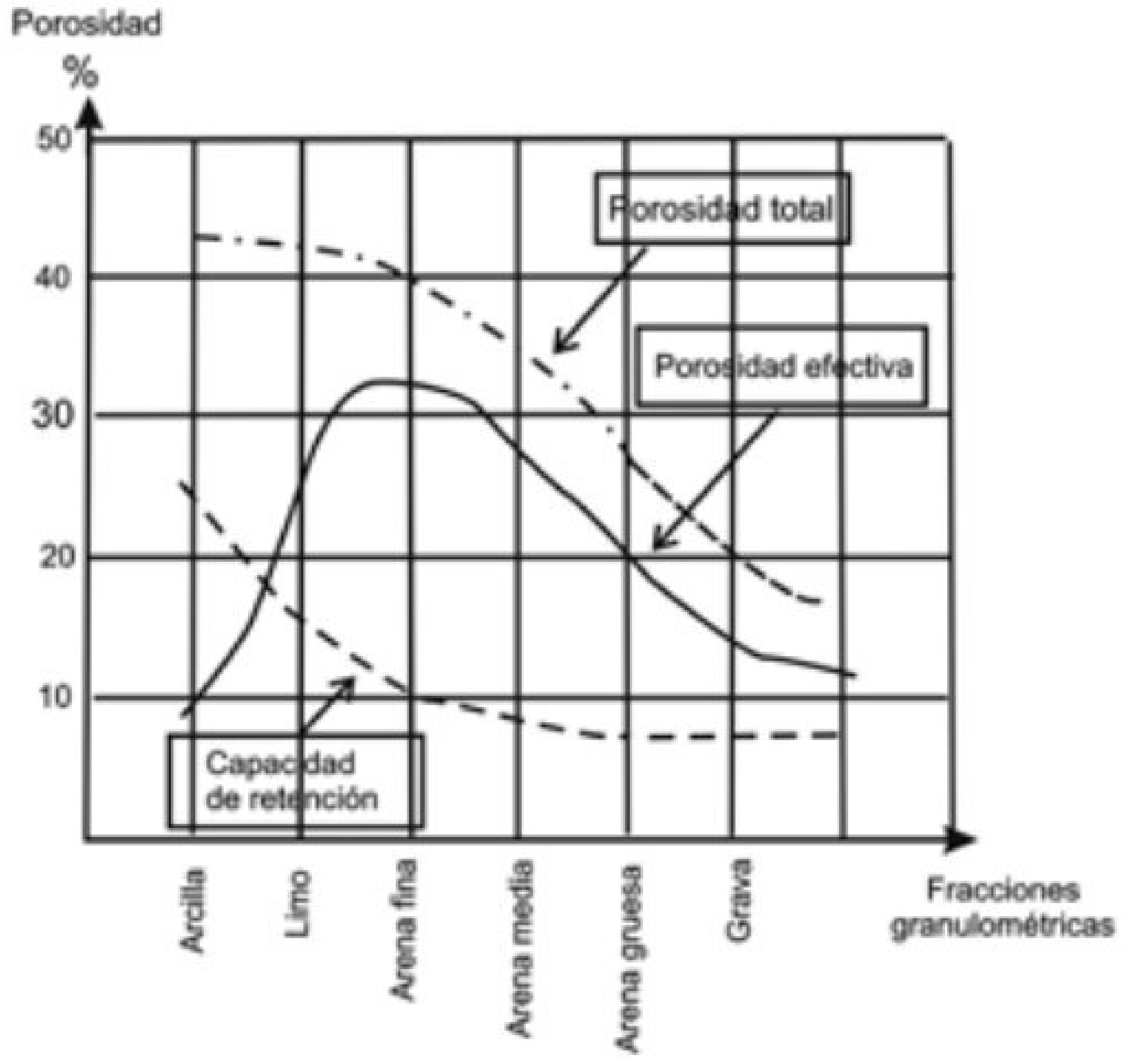


Figura 65. Fracciones granulométricas y porosidad

La *porosidad efectiva* (figura 66) de un sedimento es la relación entre el volumen de huecos (macroporos) y el volumen total del material (granos más agua adherida).

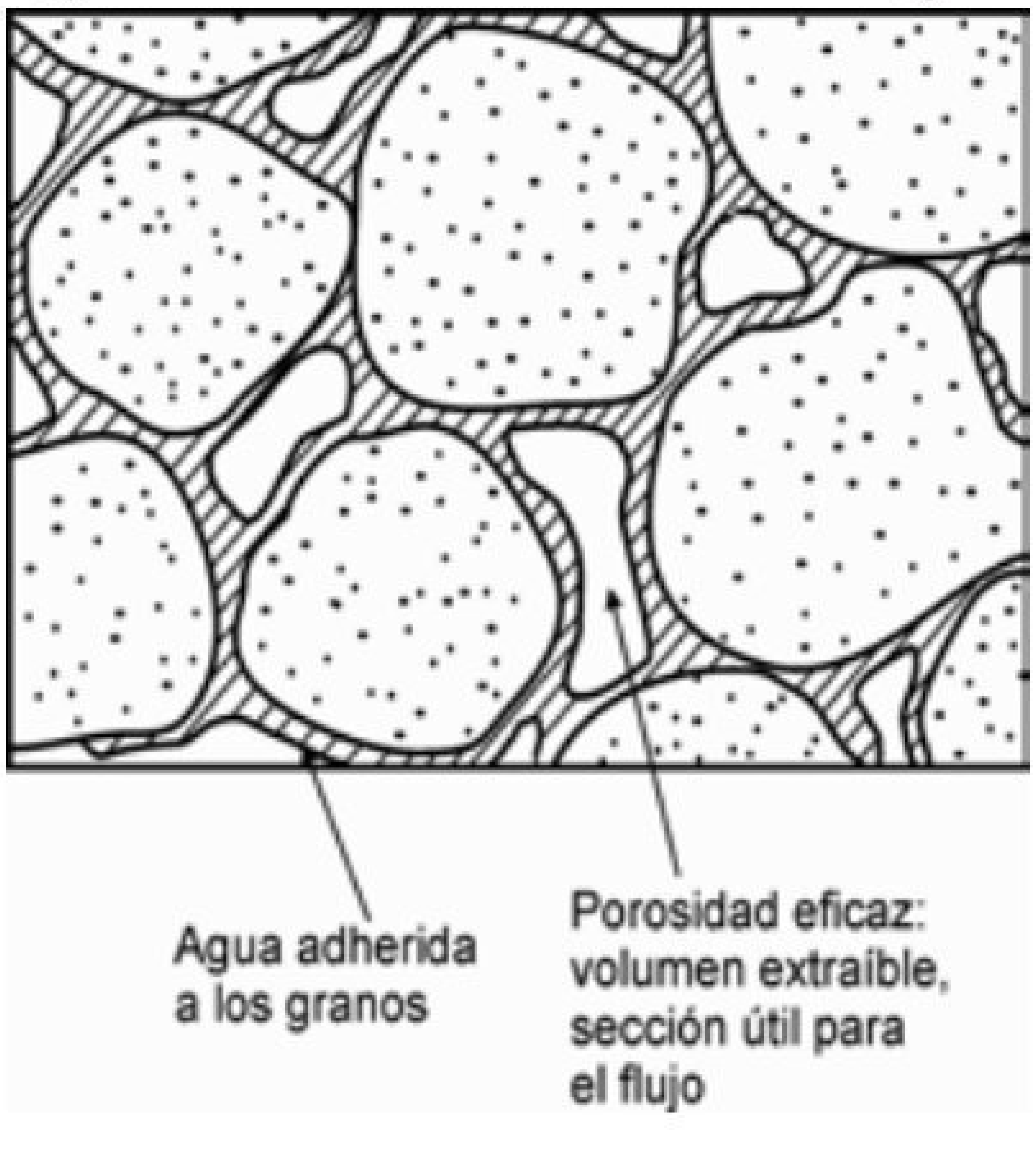

Agua adherida a los granos
Porosidad eficaz: volumen extraíble, sección útil para el flujo

Figura 66. Porosidad efectiva

La textura de la roca sedimentaria definida a partir del tamaño de grano, redondez, selección y cemento es uno de los elementos fundamentales a tener en cuenta porque incide directamente en la porosidad efectiva de la roca.

La potencia y estructura regional de la litología sedimentaria capaz de construirse en una roca almacén son muy importantes, puesto que determinan los posibles volúmenes de reserva del sistema.

Permeabilidad

Es la propiedad de permitir el pasaje de un fluido (agua) dentro de un cuerpo. Se mide en $m^3/m^2/$ seg. que, en definitiva, es una velocidad (m/seg.).

Es el caudal que pasa por una sección unidad del acuífero bajo un gradiente hidráulico unitario y a una temperatura fija. La temperatura afecta la viscosidad de los fluidos y, por tanto, influye sobre el gradiente hidráulico al afectar la perdida de carga h.

Ley de Darcy 1856: A partir de mediciones de caudal en función de la permeabilidad de los materiales involucrados observó que éste era función de:

$$Q = K.\ A.\ \frac{h}{l}$$

Donde:

- Q: caudal.
- K: coeficiente de permeabilidad.
- A: área de la sección a través de la cual produce el flujo de agua.
- h: diferencia de carga entre entrada y salida.
- l: recorrido que debe realizar el agua.

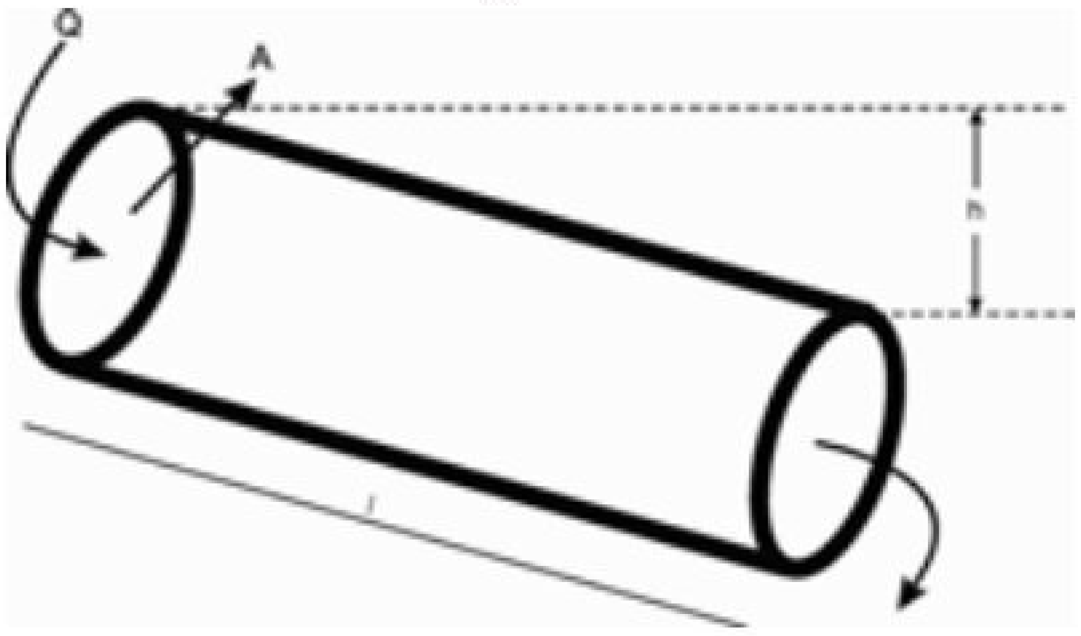


Figura 67. Cilindro de Darcy

Por lo tanto, la permeabilidad (conductividad hidráulica) es un coeficiente de proporcionalidad definido por la ecuación:

$$v = K.i$$

Siendo:

- v: velocidad de flujo (velocidad media).
- i: gradiente hidráulico.
- K: permeabilidad.

La Ley de Darcy establece que:

$$Q: K.\ A.\ \frac{h}{l}$$

Pero $\frac{Q}{A} = v = K.\ \frac{h}{l}$, por lo tanto $v = K.i$

La velocidad media del agua subterránea es función de la permeabilidad y del gradiente hidráulico:

$$1 \text{ darcy} = 10^{-3} \text{ cm /seg} = 3{,}6 \text{ cm /hora}$$

Tabla 12. Permeabilidad según tipo litológico

Tipo litológico	Coeficiente de permeablidad K ($X10^{-4}$ cm/seg)
Arcilla limosa	0,05-0,2
Limo	0,2-5
Limo arenoso	5-20
Arena limosa	20-50
Arena muy fina	50-200
Arena fina	200-500
Arena fina a media	500-1000
Arena media	1000-1500
Arena media a gruesa	1500-2000
Arena gruesa a grava fina	2000-5000

Transmisividad: es la capacidad intrínseca de un medio para transmitir agua. Depende fundamentalmente de la permeabilidad y el espesor del acuífero.

$$T = k.\ b$$

Siendo:

- K: coeficiente de permeabilidad.
- b: espesor saturado del acuífero.

La clasificación de las rocas sedimentarias en función de la transmisividad permite cuantificar sus cualidades hidrogeológicas:

Acuíferos: unidades geológicas que almacenan, ceden y dejan pasar el agua con facilidad. Por ejemplo, arenas medias a finas bien seleccionadas. ($T> 80$ cm^2/ seg.)

Acuitardos: unidades geológicas que almacenan agua subterránea pero la dejan pasar o ceden con dificultad. Por ejemplo, limos arenosos, limos, arenas arcillosas. ($T = 5$ cm^2/seg.)

Acuicludos: unidades geológicas que almacenan agua subterránea pero que no ceden ni dejan pasar agua como, por ejemplo, las lutitas. ($T = 0{,}05$ cm^2/seg.)

Acuífugos: unidades geológicas que ni almacenan ni dejan pasar agua subterránea como, por ejemplo: rocas ígneas o metamórficas inalterandas ni fracturadas.

Nivel piezométrico (NP): es la expresión de la superficie del nivel de las aguas en un punto en ausencia de bombeo. Se define como la distancia entre la superficie del terreno y la superficie del agua en el pozo.

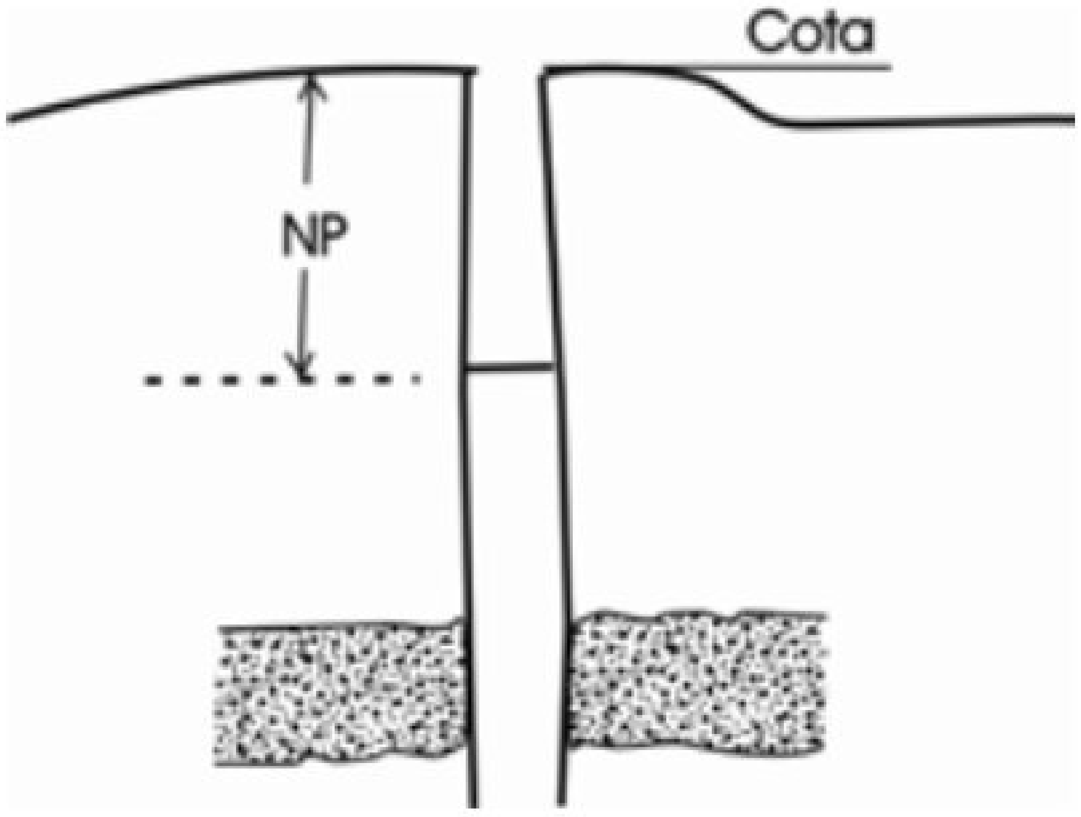


Figura 68. Nivel piezométrico

Nivel piezométrico acotado (npa): es la distancia entre el cero topográfico (nivel medio del mar) y el nivel del agua en el pozo.

NPa = Z -NP, donde Z es la cota de la boca del pozo.

Gradiente hidráulico: es la diferencia de altura entre dos niveles piezométricos acotados, dividido por la distancia entre ellos. La dirección de movimiento del agua es hacia la zona de menor NPa.

$$\text{Gradiente hidráulico} = \Delta h / l$$

$$K = \frac{Q \,.\, l}{A \,.\, \Delta h} \quad \text{por lo tanto} \quad \frac{\Delta h}{l} = \frac{Q}{A\,K}$$

Confinamiento

En el seno del acuífero la presión del agua varía según esté o no en contacto con la atmósfera, la profundidad y la carga de los materiales que cubren el acuífero (figuras. 69 y 70).

Según este parámetro se dividen en:

Libres: el nivel permeable está directamente en contacto con la atmósfera. La presión del agua en el acuífero se iguala a la atmósfera por debajo del techo del mismo.

Confinados: el techo del acuífero es un acuicluído (impermeable). La presión del agua en el seno del acuífero se estabiliza con la atmosférica por encima de su techo.

Semiconfinados: es el caso más común. El techo del acuífero es un acuitardo (semipermeable), y la presión del agua se estabiliza en el contacto con la atmósfera.

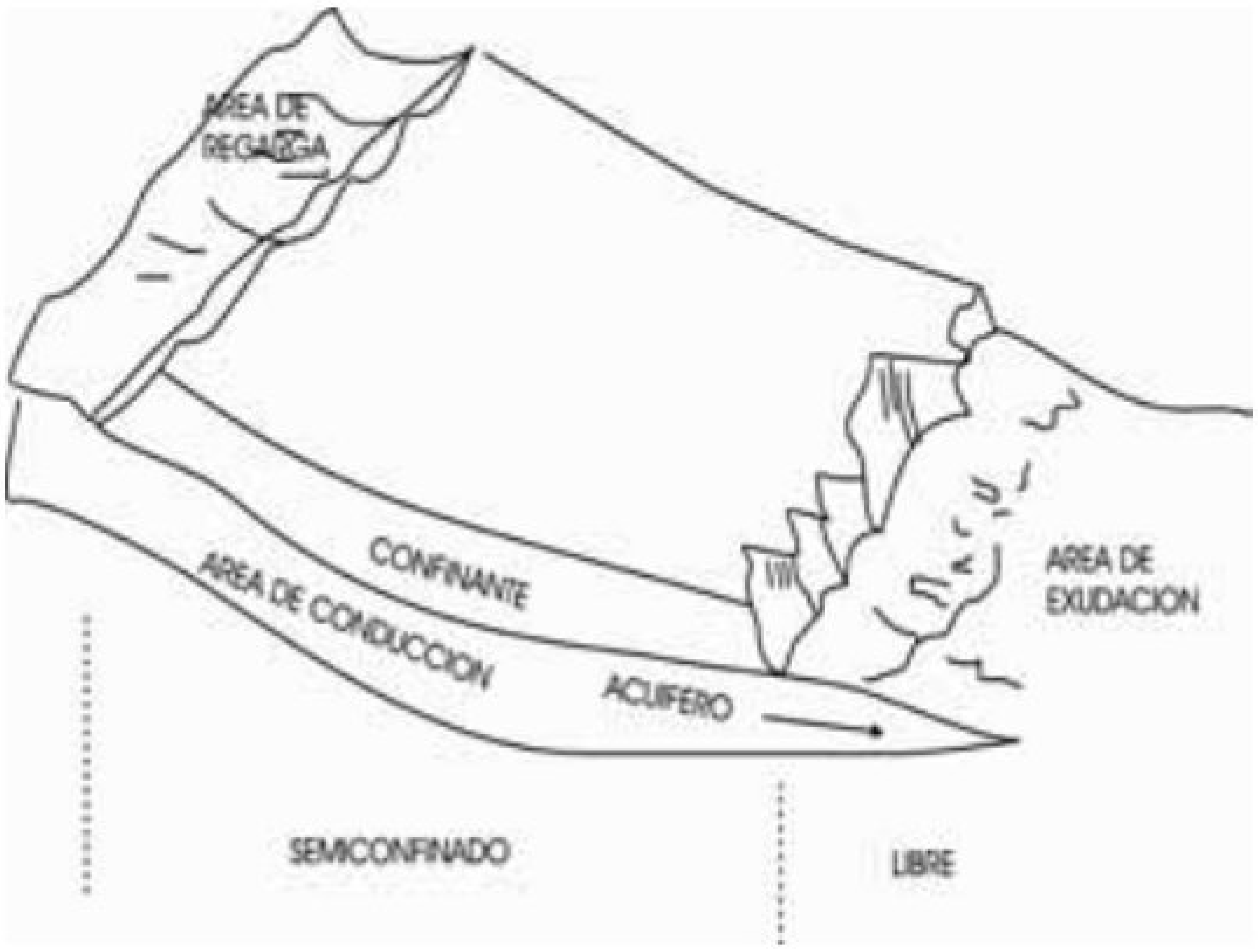

AREA DE RECARGA
CONFINANTE
AREA DE CONDUCCION
ACUIFERO
AREA DE EXUDACION
SEMICONFINADO
LIBRE

Figura 69. Área de confinamiento y recarga de un acuífero

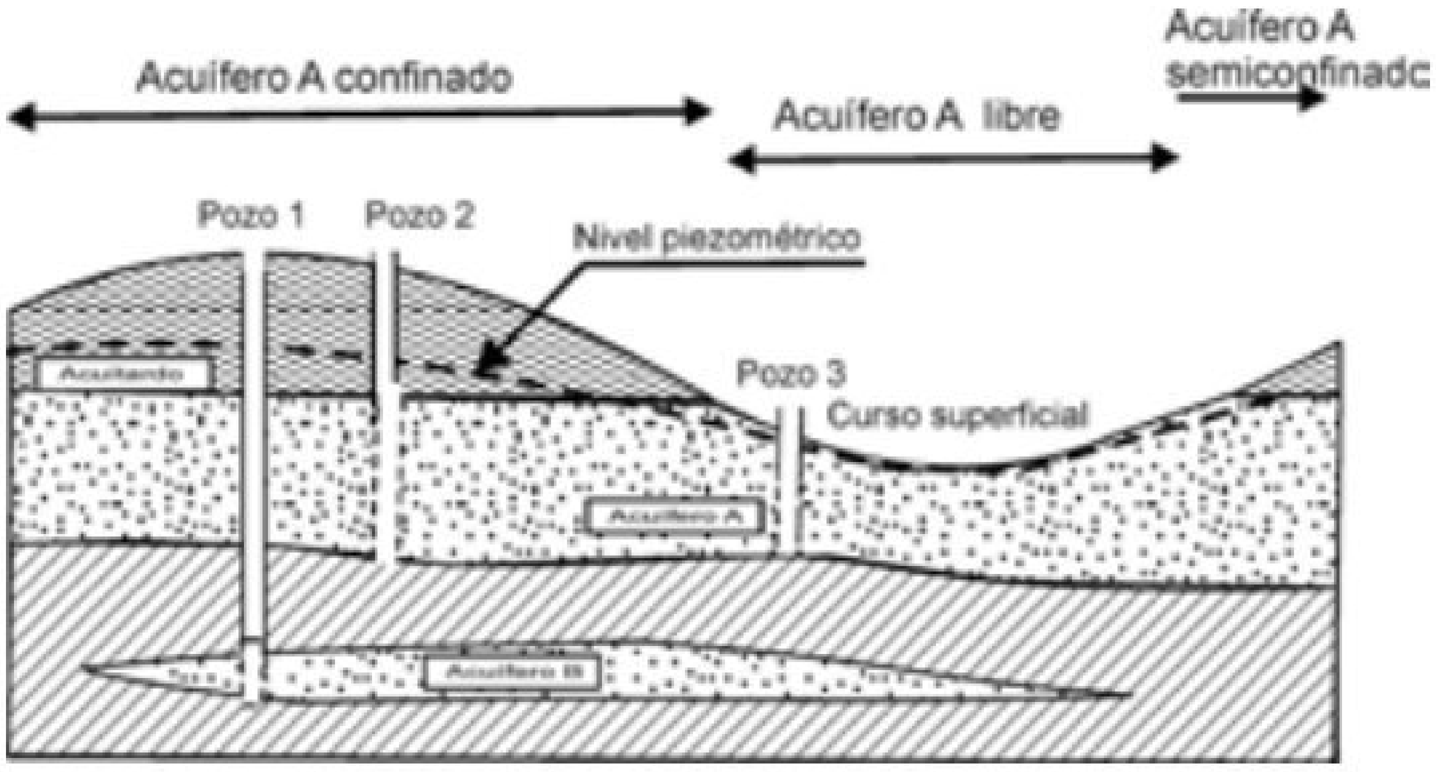

Acuífero A confinado
Acuífero A libre
Acuífero A semiconfinado
Pozo 1
Pozo 2
Nivel piezométrico
Acuitardo
Pozo 3
Curso superficial
Acuífero A
Acuífero B

Figura 70. Corte que muestra los distintos niveles de confinamiento

Todos los conceptos usados hasta ahora se aplican a acuíferos porosos.

Son estructuras sedimentarias generalmente homogéneas, lo que permite extrapolar los datos puntuales en toda la extensión de la unidad con poco riesgo de error.

A continuación se planteará la ubicación de los principales acuíferos porosos presentes en el país, así como también una breve descripción de los mismos.

8.2.1.2. Los acuíferos porosos en Uruguay

Área de los acuíferos porosos en Uruguay que presentan desarrollo regional: Guaraní, Raigón, Mercedes, Cerrezuelo y Chuy.

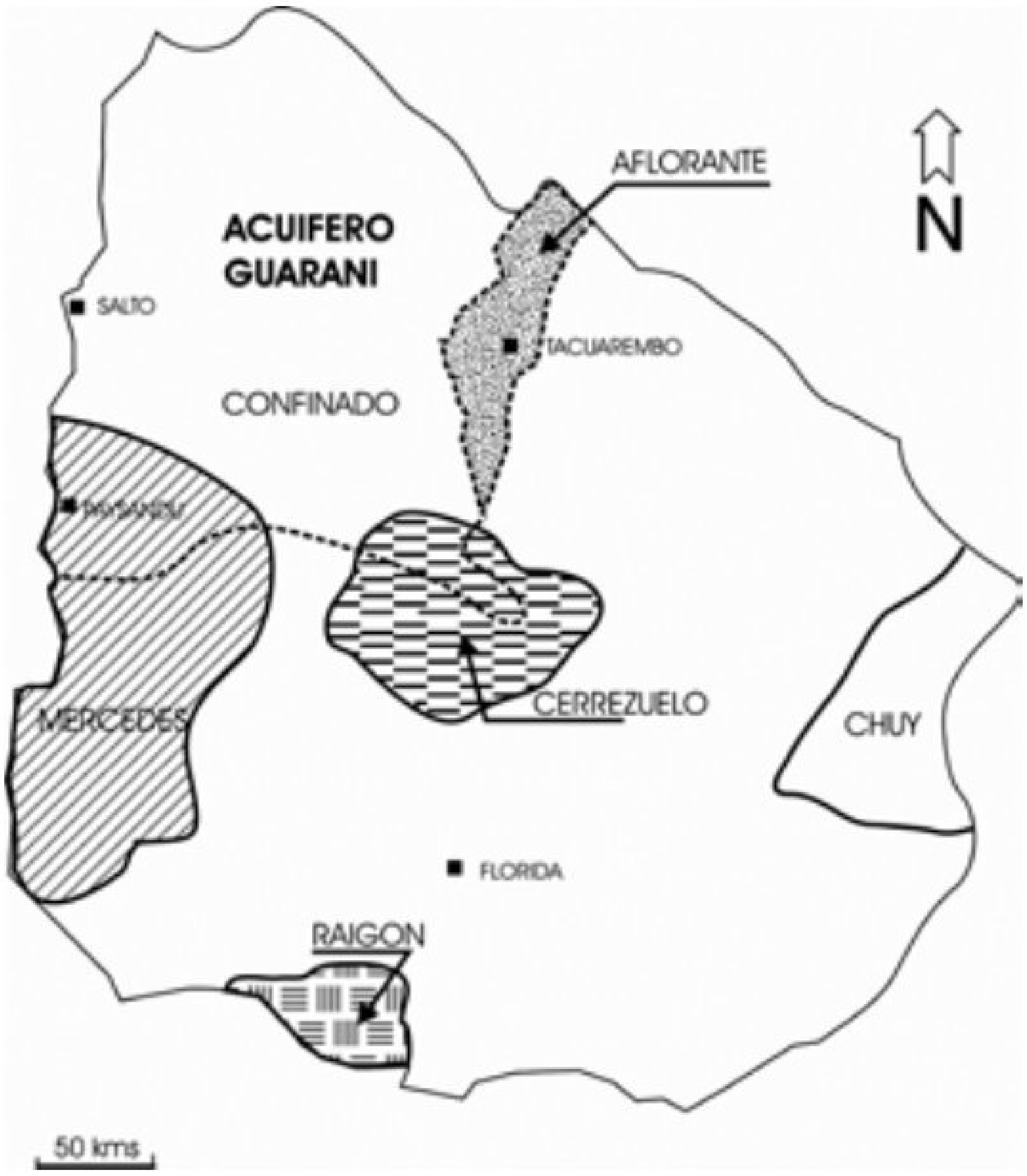

AFLORANTE
N
ACUIFERO GUARANI
SALTO
TACUAREMBO
CONFINADO
PAYSANDU
CERREZUELO
MERCEDES
CHUY
FLORIDA
RAIGON
50 kms

Figura 71. Área de los acuíferos porosos que presentan desarrollo regional

Acuífero Raigón

La Fm. Raigón es una unidad geológica terciaria de origen sedimentario que en el departamento de San José se encuentra apoyada sobre lutitas de la Fm. Camacho y cubierta por lodolitas de la Fm. Libertad. En el sureste de este departamento está integrada por tres miembros (Ortiz, 2002).

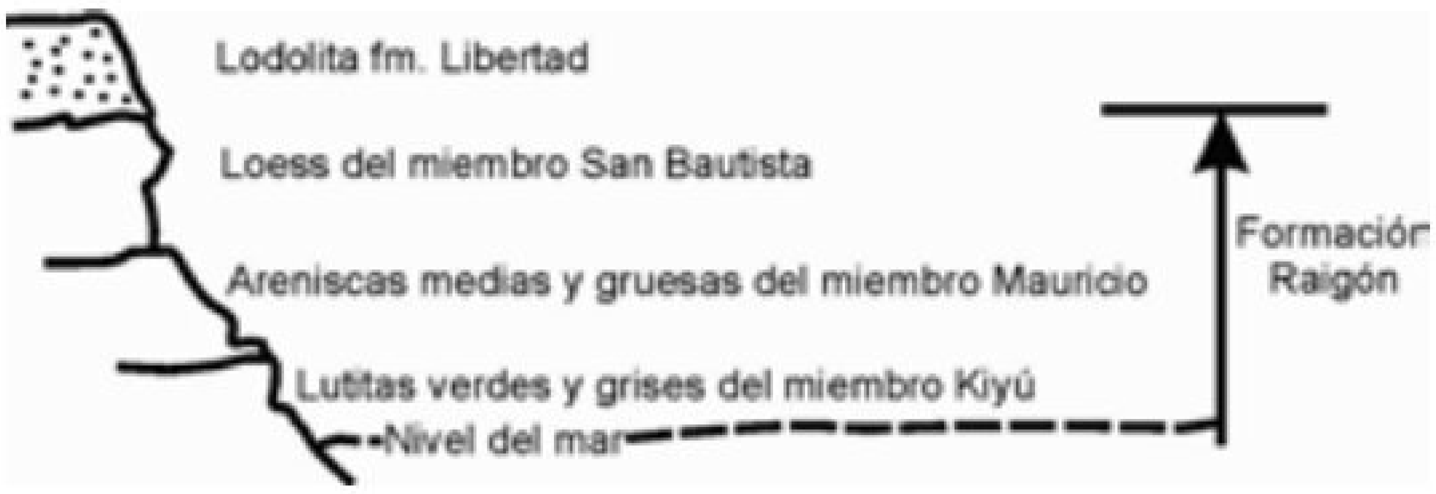

Lodolita fm. Libertad
Loess del miembro San Bautista
Areniscas medias y gruesas del miembro Mauricio
Lutitas verdes y grises del miembro Kiyú
Nivel del mar
Formación Raigón

Figura 72. Perfil que indica los miembros de la Fm. Raigón

La Fm. Libertad está siendo estudiada, pero ya hay muchas evidencias de ser el producto de meteorización y edafización del loess del miembro San Bautista (Bossi y Ortiz, 2007).

El acuífero Raigón abarca 1800 km^2 y ocupa el SE del departamento de San José, como se muestra en la figura 71. El agua subterránea se encuentra en las areniscas y limos pardos.

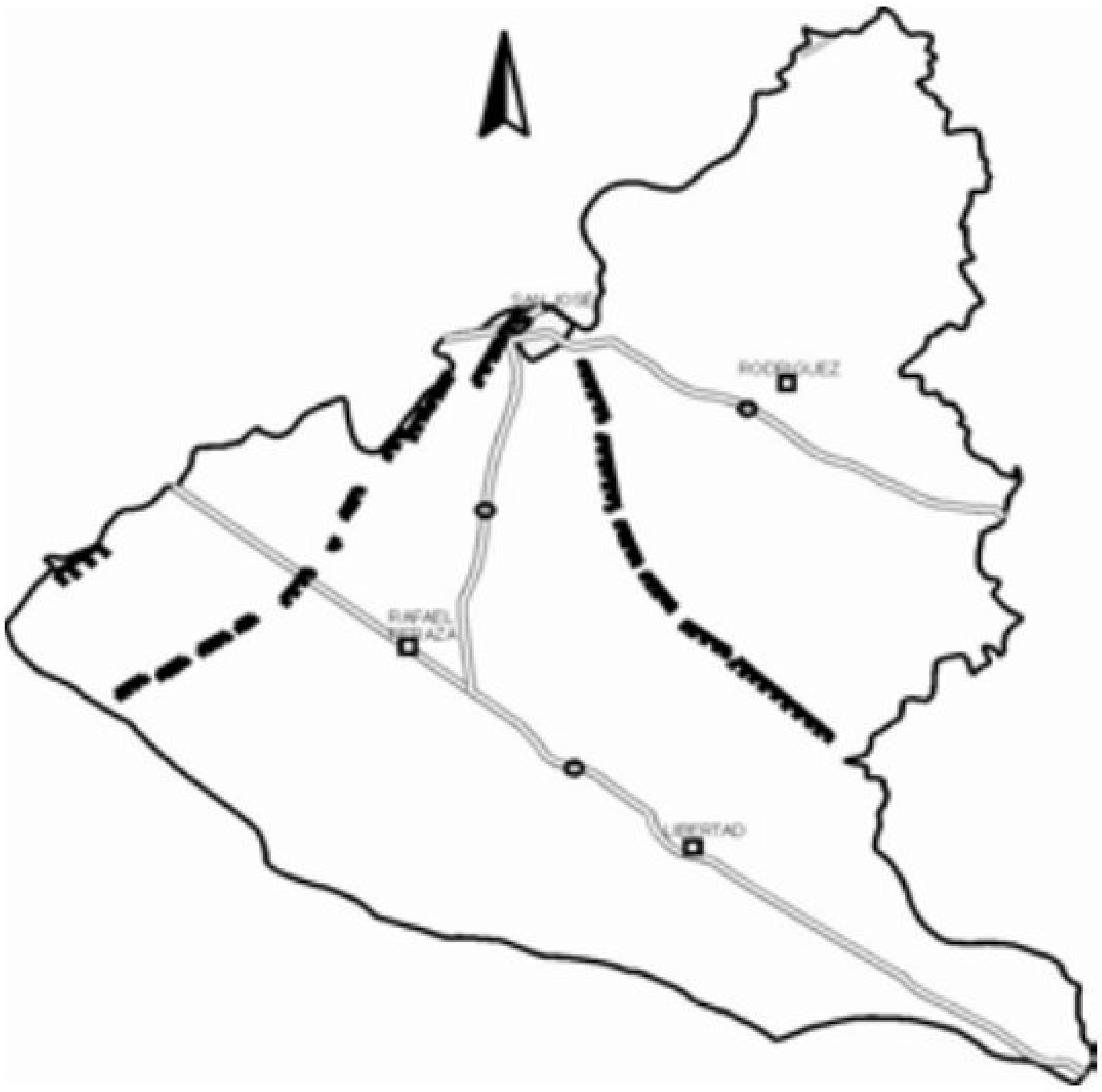


Figura 73. Ubicación del acuífero Raigón

En las perforaciones de PRENADER de la ruta 1 (figura 73) se puede ver claramente la referida alternancia. Otro rasgo geológico a tener en cuenta para definir el modelo conceptual (medio acuífero + sistema hidráulico + geometría) es la existencia de dos fallas importantes: una NW, donde se instaló el curso actual del río San José, y otra NE, donde se instaló el arroyo Pereyra. Estas fallas dividen el acuífero en tres zonas, de las cuales las más importantes son Rodríguez y Libertad.

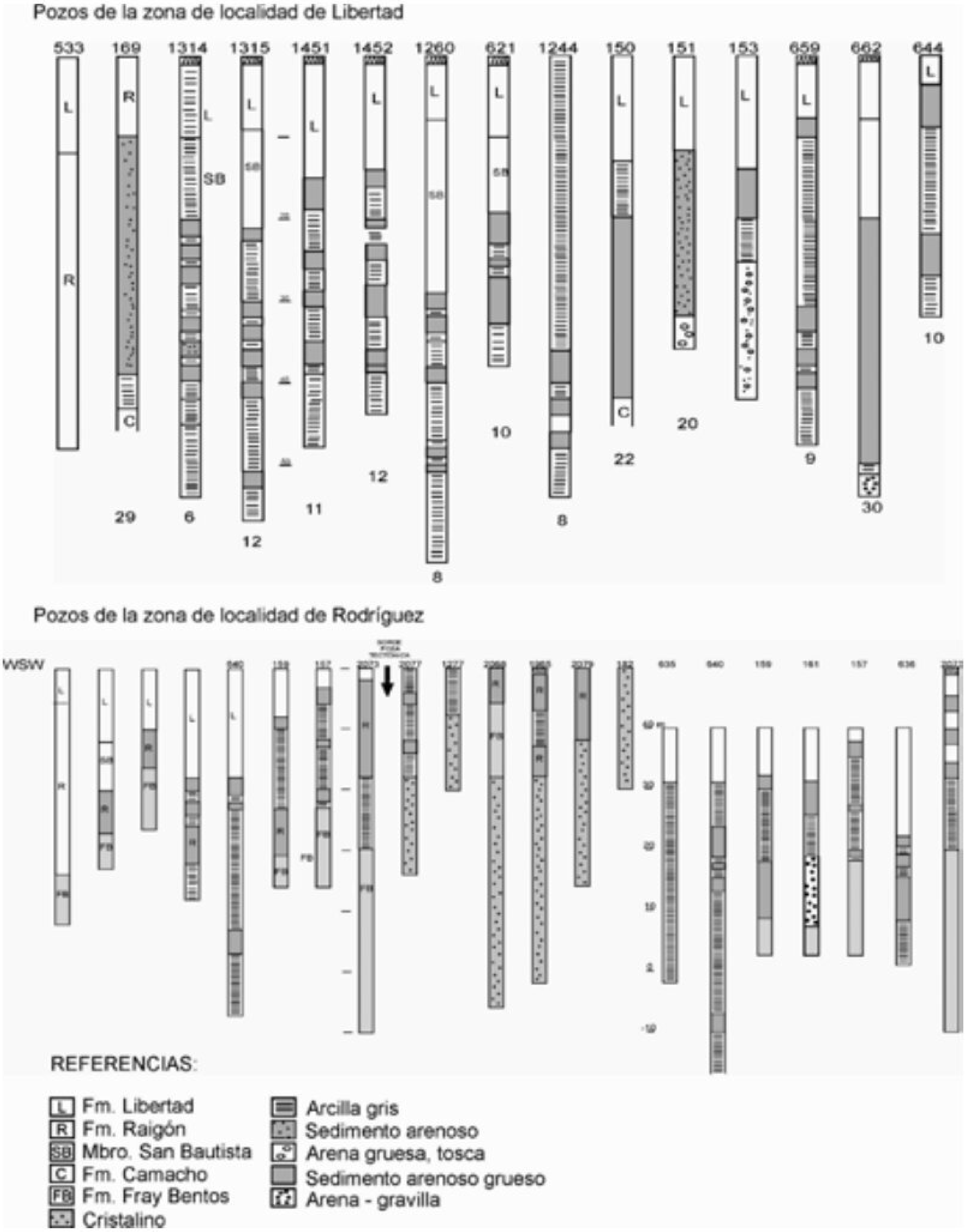

Pozos de la zona de localidad de Libertad
533
169
1314
1315
1451
1452
1260
621
1244
150
151
153
659
662
644
L
R
SB
C
29
6
12
11
12
8
10
8
22
20
9
30
10
Pozos de la zona de localidad de Rodríguez
WSW
REFERENCIAS:
L Fm. Libertad
R Fm. Raigón
SB Mbro. San Bautista
C Fm. Camacho
FB Fm. Fray Bentos
Cristalino
Arcilla gris
Sedimento arenoso
Arena gruesa, tosca
Sedimento arenoso grueso
Arena - gravilla

Figura 74. Pozos de la zona de Libertad y Rodríguez

El estudio de los perfiles geológicos permite suponer recarga en toda el área:

- Lenta a través de los limos.
- Rápida en arenas no confinadas.

Este acuífero presenta los siguientes datos hidrogeológicos:

Tabla 13. Datos hidrogeológicos del acuífero Raigón

Volumen almacenado	$1800 * 10^6$ m^3
Permeabilidad eficaz (arena media)	$1000 \pm 100 * 10^{-4}$ cm/seg
Transmisividad	400-500 m^2/día <> 30 – 60 cm^2/seg
Caudales específicos medios	
Norte	5 m^3/h/m
Sur	10 m^3/h/m
Caudales normales	30 – 100 m^3/h
Profundidad media	40 m
Gradiente hidráulico medio	0,003 (3 m / Km)

Acuífero Guaraní

Es abundante la bibliografía sobre este acuífero sedimentario que ocupa alrededor de 1.000.000 de km^2, con la mayor área en Brasil pero con más de 45.000 km^2 en Uruguay, de los cuales afloran 5.000 km^2.

En el área aflorante el acuífero es libre y en el resto del área se desarrolla como confinado al estar cubierto por unidades geológicas más modernas e impermeables, siendo la principal estructura confinante el grupo Arapey.

Desde el punto de vista agronómico resulta interesante conocer sus características, ya que existe una faja de 20 a 30 km de ancho y unos 200 km de longitud en que el espesor de los basaltos confinantes es inferior a 200 m y puede ser rentable, desde el punto de vista agronómico, hacer una fuerte inversión para disponer de grandes caudales de agua.

En la región V, a nivel de sistemas acuíferos poco profundos, solo es posible la existencia de acuíferos de fisura, cuya roca almacén está constituida por los basaltos del grupo Arapey. Esta región tiene la particularidad de que existe en profundidad un acuífero regional infrabasáltico poroso: el acuífero Guaraní. El techo de este acuífero lo constituye la Fm. Rivera y el piso la Fm. Buena Vista.

En la figura 74 se muestra el límite tentativo del acuífero Guaraní en Uruguay. Cattaneo *et al.* (1992) determinan para este acuífero una potencia de 500 metros, con coeficiente hidráulico de transmisividad de 800 m^2/día, y permeabilidad de 1,8 m/día, considerando para el área aflorante una permeabilidad muy próxima a 0,3 m/día.

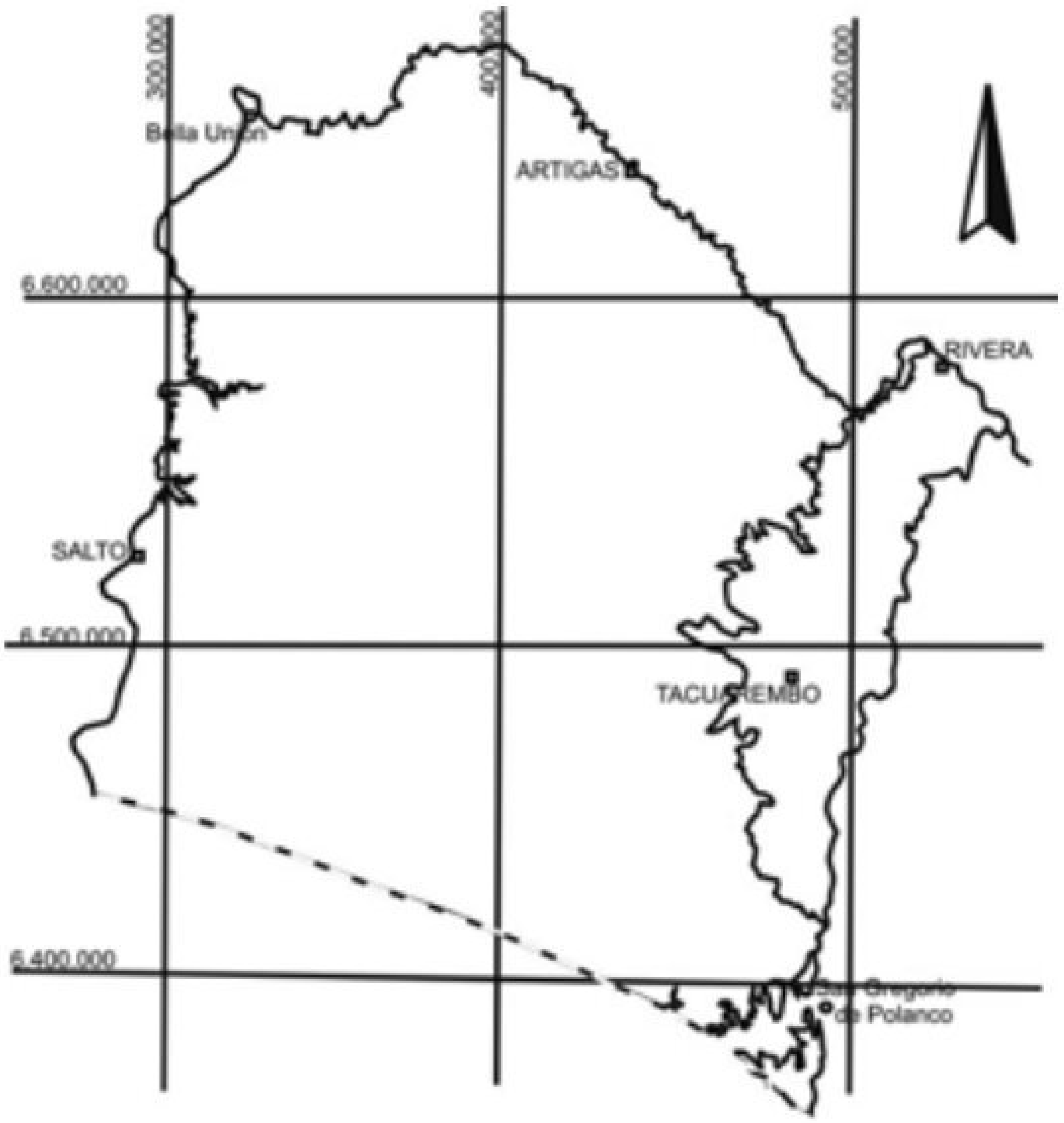


Figura 75. Límite tentativo del acuífero Guaraní en Uruguay

Descripción de la geología componente del acuífero Guaraní

El acuífero Guaraní está integrado por la Fm. Buena Vista y el Grupo Batoví Dorado. Constituido por las formaciones Rivera, Tacuarembó y Cuchilla Ombú, aflora como una faja continua en dirección NS desde Rivera a Durazno (aparecen relictos de erosión en el departameto de Cerro Largo). Hacia el W esta faja aflorante queda cubierta por los derrames basálticos del Grupo Arapey.

Tanto la Fm. Rivera como la Fm. Cuchilla Ombú representan excelentes acuíferos, alimentados en la faja aflorante Rivera–San Jorge, que proporcionan aguas termales surgentes en Arapey, Daymán y Guaviyú.

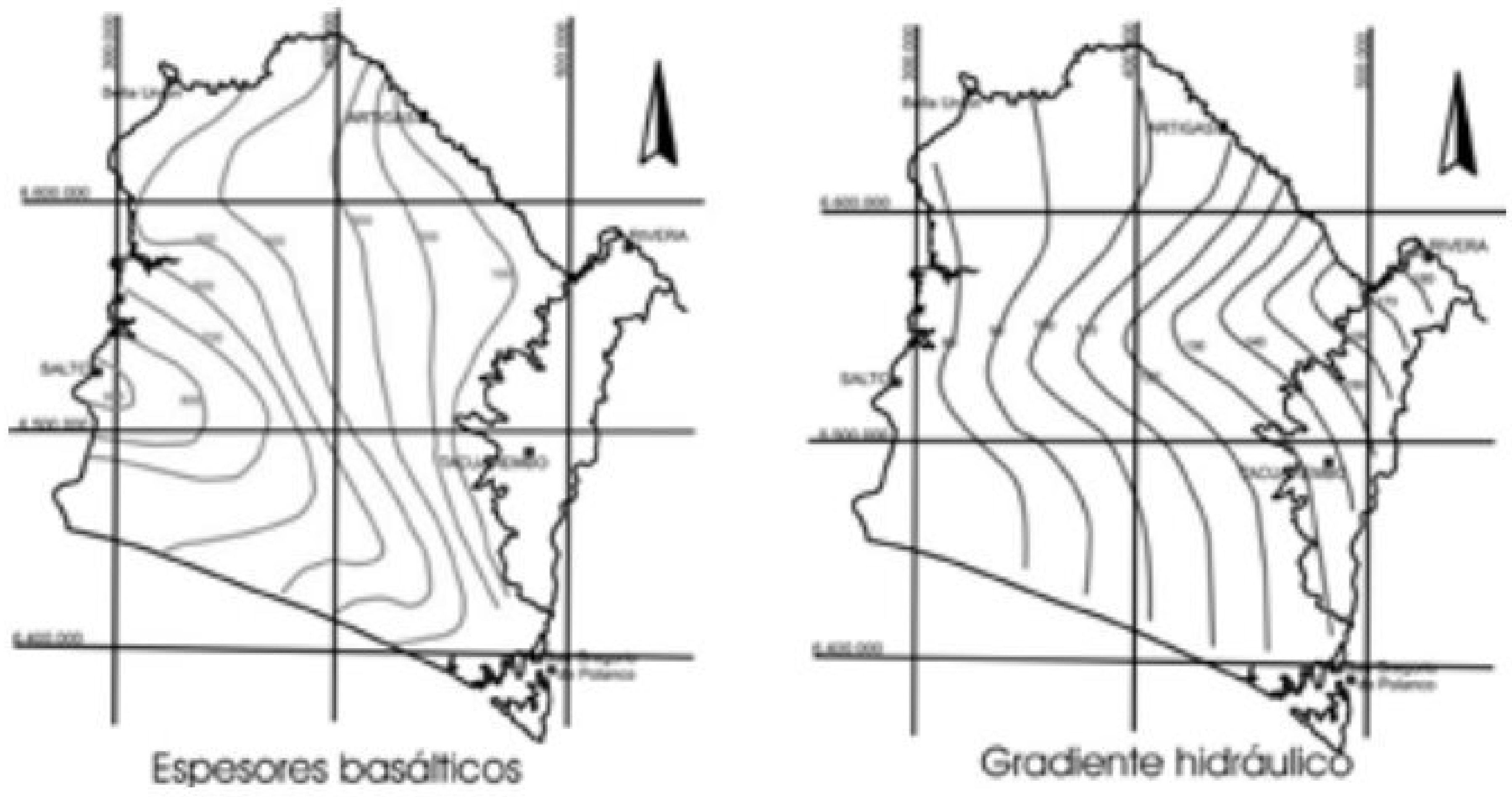
Está constituido por una sucesión de areniscas eólicas y fluviales de edad Triásico-Jurásico, con espesores variables —desde pocas decenas hasta varios centenares de metros—. Según Tujchneider (1998), las formaciones geológicas que lo integran existen en un área que supera el millón de kilómetros cuadrados y están cubiertas por potentes derrames basálticos de edad cretácica. Tiene reservas almacenadas de 40.000 km^3 y es realimentado por la infiltración de parte de las lluvias por un volumen de 250 km^3/año.

Hoy abastece 300 ciudades de Brasil con poblaciones entre 5000 y 500.000 habitantes. El acuífero Guaraní comprende las formaciones Buena Vista, Cuchilla Ombú, Tacuarembó y Rivera. Se apoya sobre areniscas finas y limolitas de la Fm. Yaguarí y es confinado por derrames de basalto. Los espesores varían entre 400 y 650 m que, a su vez, están saturados de agua. La explotación de pozos profundos puede dar caudales de 300 a 400 m^3/hora, pudiendo alcanzar 1000 m^3/hora mediante bombeo.

Tabla 14. Columna estratigráfica de las formaciones que componen el Acuífero Guaraní			
Edad	Grupo	Formación	Litología
Cretácico Inferior		Fm. Arapey	Lavas básicas
Jurásico	Batoví Dorado	Fm. Rivera Fm. Tacuarembó Fm. Cuchilla Ombú	Areniscas finas con estratificación cruzada. Areniscas, limolitas, lutitas, areniscas, pelitas blancas y rojizas.
Triásico inferior		Fm. Buena Vista	Areniscas blancas y rojizas
Pérmico Superior		Fm. Yaguarí	Siltitos, pelitas.

En los departamentos de Salto, Artigas y Paysandú se logran pozos surgentes y termales. El termalismo proviene del aumento de temperatura —de 1° C cada 33 m (gradiente geotérmico)— y la surgencia por debajo de cota +60 m, debido a que el nivel piezométrico acotado es del orden de 80 m.

La estructura del acuífero se obtuvo compilando datos de 135 pozos (Montaño y Collazo, 1998). El espesor basáltico puede llegar a 200 m, el mapa potenciométrico de gradiente hidráulico disminuye hacia el sw y el espesor de confinante aumenta hacia el w (figura 76) (Heinzen *et al.*, 2003.



Espesores basálticos

Gradiente hidráulico

Figura 76. Espesores de basalto y gradientes hidráulicos del Acuífero Guaraní

Las reservas permanentes son diferentes para el área aflorante y el área confinada, según Montaño *et al.* (1998).

Tabla 15. Reservas permanentes del acuífero Guaraní					
	Área (Km^2)	Espesor acuífero (m)	Porosidad eficaz	Volumen (m^3)	T (m^2 /día)*
No confinado	3700	100	0,15	5,6*10^{10}	25 a 150
Confinado	38.000	600	10^{-4}	2,3*10^{9}	250 a 1000

- Transmisividad: 1m^2/día <> 0,11 cm^2/segundo

Hidrogeoquímica: según Montaño y Collazo (1997) el área aflorante tiene aguas cloruradas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas, según el diagrama de Piper (figura 77). En esta zona el $[Ca^{++}] > [Na^+]$. El valor medio de dureza total es de 45 mg/lt expresado en $CaCO_3$, lo que significa 0,9 meq/lt. El valor medio del residuo seco es de 120 ppm.

En el área confinada las aguas son bicarbonatadas sódicas con valor medio de dureza total de 65 mg/lt, expresado en $CaCO_3$ (1,2 meq/lt).

Aquí $[Na^+] > [Ca^{++}]$

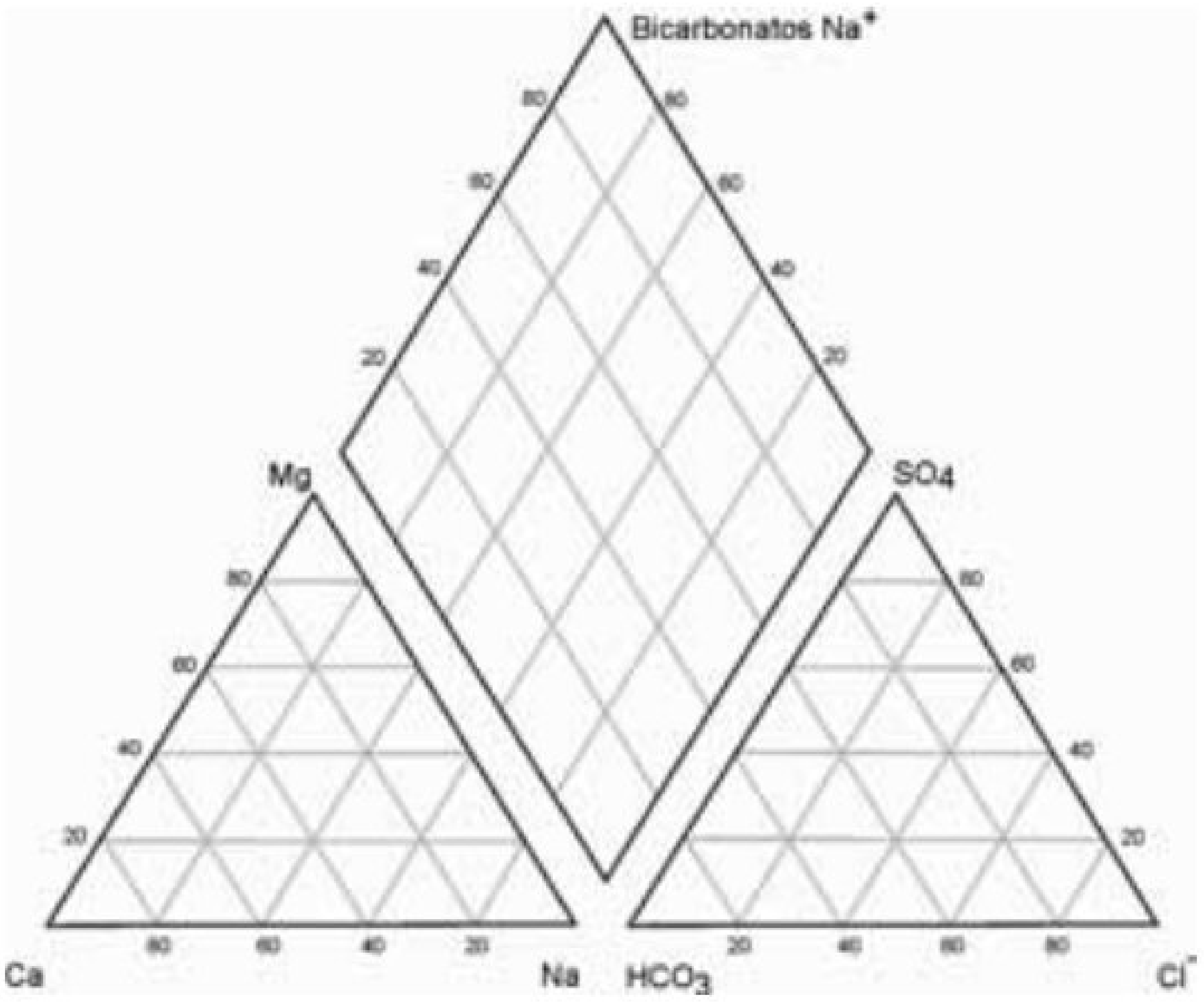


Figura 77. Diagrama de Piper

En Uruguay el acuífero Guaraní tiene una reserva de 5,8*10^{10} m^3, convirtiéndose en el mayor reservorio de agua dulce descubierto hasta el momento. Este volumen es realimentado por una tasa media anual de, aproximadamente, 1,4*10^8 m^3/año, representando el potencial renovable que circula por el acuífero.

La explotación con pozos puede alcanzar caudales cercanos a los 800 m^3/ hora, transformándose en una de las fuentes hídricas con capacidad para sostener emprendimientos de abastecimiento público, riego, fábricas, secado de grano, amortiguación de heladas, etc.

En el litoral norte las aguas varían entre 33° C a 45° C, con caudales surgentes de 100m^3 (9*10^5 m^3/año), convirtiéndose en el sector turístico fuera de temporada más pujante del país.

La calidad del agua, tanto de la unidad Rivera como de la unidad Tacuarembó, correspondientes al área aflorante, no presentan limitaciones de potabilidad, clasificándose en cloruradas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas según el diagrama de Piper.

La zona confinada ocupa 3800 km^2 con un espesor de hasta 600 m, presentando reservas del orden de 10^{10} m^3. Los valores de transmisividad llegan a 1000m^2/día, lo que equivale a 110 cm^2/seg, permitiendo extraer caudales de > 400m^3/hora. La recarga media anual es del orden de $1{,}4*10^8$ m^3/año.

Las cifras de cada autor son diferentes, pero los grandes números indican la importancia de este acuífero, hoy solo aprovechado con fines turísticos en Uruguay.

La posibilidad de aprovechamiento de este acuífero en la producción agropecuaria es un campo no investigado en Uruguay. Sin embargo, a medida que se difundan datos sobre volúmenes, caudales, temperatura, composición química, salinidad y niveles piezométricos, tendrá que instalarse un programa específico por la aparente rentabilidad de tal empresa. Esta agua tiene gran valor agronómico potencial por disponer de enormes caudales con bajo costo de operación, una salida a temperaturas entre 35-40° C, con lo que se podrían evitar heladas y, por supuesto, anular los efectos de la más larga sequía.

El acuífero Guaraní necesita ser estudiado en detalle con una estación regional y analizar las posibilidades de uso agronómico.

Acuífero Mercedes

Unidad hidrogeológica Cretácico Superior:

Se localiza principalmente en la costa del río Uruguay, en los departamentos de Paysandú, Río Negro, Soriano y Colonia. Se trata de arenas finas a medias, con variaciones de granulometría más groseras, llegando a niveles gravillosos con cantos. Presentan cemento arcilloso y calcáreo, y también niveles de silicificación y ferrificación.

Los caudales específicos medios son variables entre 0,1 y 3,4 m^3/h/m y residuo seco de 500 mg/l (según Heinzen *et al.*: 2003).

Según Montaño *et al.* (2001), la transmisividad varía entre 5,0 y 100 m^2/día, y el coeficiente de almacenamiento presenta valores de 10^{-2} y 10^{-4}. El caudal específico está comprendido entre 0,10 a 3,40 m^3/h/m.

Unidad acuífera Mercedes

Está dominantemente integrada por rocas psefíticas, descritas como conglomerados o areniscas conglomerádicas gravillosas, que evolucionan en una secuencia estrato y granodecreciente hacia el contacto con el miembro superior. Este es preponderantemente psamítico, donde predominan areniscas medias, mal seleccionadas cuarzosas, con escasa matriz arcillosa, parcialmente silicificadas. Es la unidad que potencialmente tendría los mejores valores de porosidad, por lo que sería el acuífero regional más importante. Es de tipo semi-confinado al este y confinado al oeste. Su confinamiento es menor cuando está cubierto por la Fm. Asencio y mayor cuando, además, está recubierto por la Fm. Fray Bentos. La zona de recarga directa se encuentra en áreas cercanas a la población de Piedras Coloradas. La zona de recarga indirecta se ubica en las zonas de afloramiento de la Fm. Asencio, tanto en posición de interfluvio como de cabeceras de valles. La zona de recarga indirecta a través de la Fm. Fray Bentos se considera mínima o inexistente. Debido al tamaño de grano grueso predominante en la formación su permeabilidad es elevada, lo que da lugar a caudales de pozos que van desde 2.000 a 30.000 litros por hora. El acuífero presenta una piezometría estable con líneas de flujo paralelas y descarga hacia el río Uruguay. El gradiente hidráulico varía entre 2,5% y 0,7% (Montaño: 2000).

El sistema acuífero litoral está contenido en el grupo Paysandú, particularmente en la Fm. Mercedes, de ubicación estratigráfica intermedia entre la Fm. Asencio y la Fm. Guichón. El grupo se apoya sobre las rocas basálticas pertenecientes al Grupo Arapey al norte —en los departamentos de Paysandú y Río Negro—, y en las rocas metamórficas e ígneas del Basamento Cristalino al sur —en los departamentos de Soriano y Colonia.

Acuífero Cerrezuelo

La Fm. Cerrezuelo, junto con las Fms. La Paloma y Cordobés, pertenece al Grupo Durazno. Está constituida por areniscas feldespáticas de grano grueso en la base y areniscas conglomerádicas medias y finas en la cima, además de esporádicos lentes de lutitas caoliníticas.

Las litologías que en ellas se desarrollan, y su estructura geológica, posibilitan el desarrollo de un sistema acuífero poroso de carácter local o regional.

Puede constituir un acuífero libre, cuando aflora, o confinado de carácter local.

Esta formación de importancia hidrogeológica puede aparecer hasta profundidades de:

- 36 a 130 m en Blanquillos.
- 145 a 288 m en La Paloma.
- 262 a 372 m en Rincón del Bonete.

Según Heinzen *et al.* (2003), la unidad acuífera Cerrezuelo incluye arenas gruesas y gravilla, con niveles de arena fina a media con matriz arcillosa. Los caudales específicos están en el entorno de 1,5 $m^3/h/m$ y el residuo seco promedio es de 800 mg/l.

A continuación se expone un cuadro elaborado en base a la descripción de una perforación realizada en La Paloma (Durazno). Para mayor detalle se puede consultar Bossi y Navarro (1988). Lo que se pretende mostrar en este cuadro son las diferentes transmisividades que surgen de los distintos niveles de esta formación. Se tomaron diversas permeabilidades según fuera la litología dominante.

Tabla 16. Diferentes transmisividades según espesor para el Acuífero Cerrezuelo.

Profundidad (m)	Descripción	Espesor (cm)	Permeabilidad* (cm/seg.)	Transmisividad (cm^2/seg.)
145-160	Areniscas finas de color gris claro, con estratificación cruzada, abundante mica y lechos piritosos.	1500	350*10-4	52,5
160-163	Rocas limosas masivas de color pardo.	300	2,6*10-4	0,078
163-229	Areniscas finas bien estratificadas, con lechos alabeados de mica y sustancia carbonosa; color gris claro.	6600	350*10-4	231
229-243	Areniscas finas, feldespáticas, micáceas, de tonos rojizos, lila y amarillentos, con estratificación esporádicamente bien marcada. Contiene niveles de pocos metros de areniscas gruesas y algunos lentes arcillosos.	1400	350*10-4	49
243-247	Lutitas grises, micáceas, que se tornan arenosas hacia la base. Esporádicos lentes angulosos.	400	0,125*10-4	5*10-3
247-260	Areniscas gruesas y conglomerádicas, muy feldespáticas de colores rojizos; el tamaño de grano medio alcanza a 3 mm y los granos son muy angulosos.	1300	3500*10-4	455
260-263	Areniscas finas, micáceas, con lechos arcillosos y limosos. Todas estas litologías de tonos rosados.	300	350*10-4	10,5
263-271	Areniscas gruesas, muy feldespáticas, normalmente ferruginosas; la selección es mala y los granos son angulosos. No existe estratificación visible.	800	3500*10-4	280
271-272	Lutita blanca con parcial impregnación férrica.	100	0,125*10-4	1,25*10-3
272-281	Areniscas gruesas, muy feldespáticas de colores rojo y amarillo, con lechos caolínicos blancos de algunos centímetros y niveles ocráceos de hasta 1 m de potencia.	900	3500*10-4	315

Se utilizó como valor de permeabilidad el promedio de los extremos para cada litología (ver tabla 12).

Del cuadro elaborado se desprende que a 145 m la formación se comporta como un acuífero, puesto que su transmisividad es de 52,5 cm^2/seg.

Acuífero Chuy

Se desarrolla en la Fosa Tectónica de la laguna Merín por debajo de 10 a 20 metros de rocas limosas friables de la Fm. Dolores. Varias perforaciones profundas muestran que tiene un espesor de 40-50 metros y está compuesto por una alternancia de sedimentos marinos con lamelibranquios fósiles y niveles continentales con restos de vegetales arbóreos.

Todas las perforaciones dan agua subterránea con caudales muy importantes, pero la mayoría no son utilizables por la altísima salinidad y el contenido en cloruro y sodio. Los datos disponibles muestran que esa sensibilidad responde a que el agua contenida en los niveles arenosos no ha sido removida por agua de lluvia. Esa capa de 10 a 20 metros de espesor de limos de la Fm. Dolores actúa como confinante impermeable e impide la renovación del agua, como se sugiere en la figura 78.

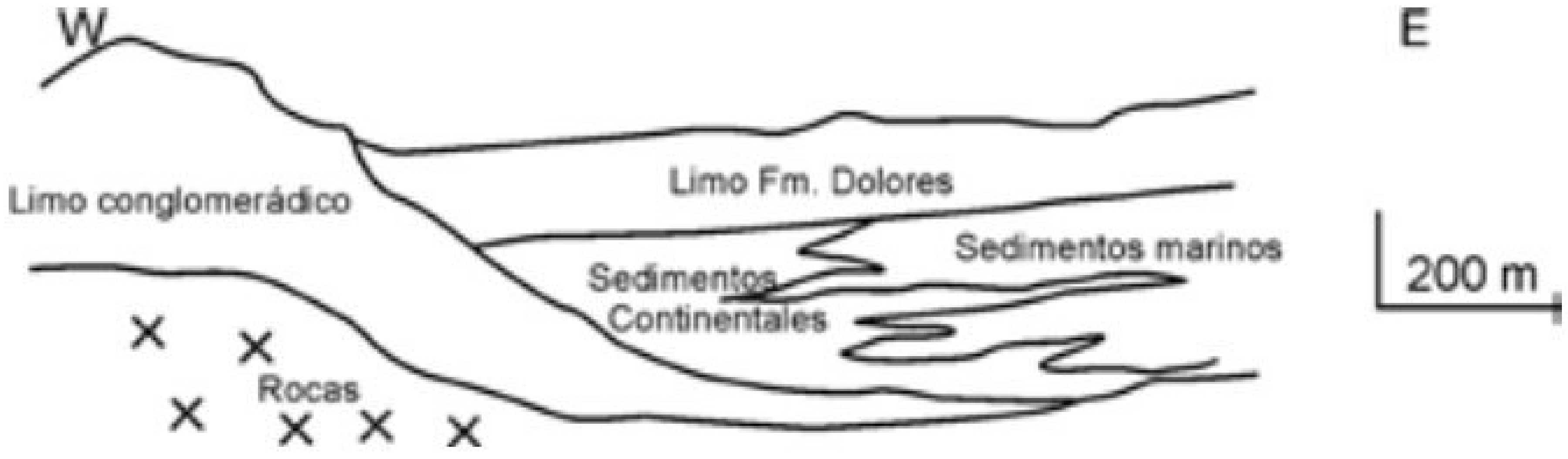


Figura 78. Confinamiento del Acuífero Chuy por la Fm. Dolores

En un informe para PROBIDES se estudiaron los alrededores del poblado San Luis, constatándose que el río San Luis genera barrancas de seis a diez metros de altura, pero no llega a atravesar los limos de la Fm. Dolores. También pudo determinarse que las aguas del mencionado río tenían muy bajo contenido salino, por lo que debería financiarse la posibilidad de corregir artificialmente al acuífero, inyectándole agua dulce unos dos kilómetros aguas arriba del pozo que alimenta el poblado.

Esto es realizable perforando pozos y bombeando agua del río, si fuese necesario, aunque los primeros estudios no indican surgencia, de modo que se puede perforar el fondo del río y, con la extracción en San Luis, se generaría suficiente depresión para el ingreso del agua dulce. Los datos de Heinzen *et al.* (2003) para el pozo en Cebollatí indican nivel estático de cinco metros, caudal de 30.000 l/hora y 950 ppm de residuo seco.

8.2.2. Acuíferos de Fisura

Se encuentran en rocas impermeables que pueden ser sedimentarias cementadas, metamórficas o ígneas.

Son de enorme importancia porque en Uruguay más del 50% del subsuelo está constituido por rocas ígneas o metamórficas (figura 78).

Las rocas no porosas se comportan rígidamente y se fracturan cuando son sometidas a esfuerzos. Estas fracturas recortan las rocas cristalinas y pueden contener agua hasta profundidades de 70±20 m desde la superficie.

La única forma de obtener agua en áreas de rocas cristalinas es ubicar una perforación que intercepte una o más fracturas (figura 79). Como la mayoría de las fracturas son casi verticales la ubicación exacta requiere un delicado estudio previo.

Dichas fracturas deben estar abiertas, es decir, no rellenas de arcillas o limos resultantes de la meteorización o acumulación. Además, las fracturas deben estar conectadas con la superficie para poderse recargar.

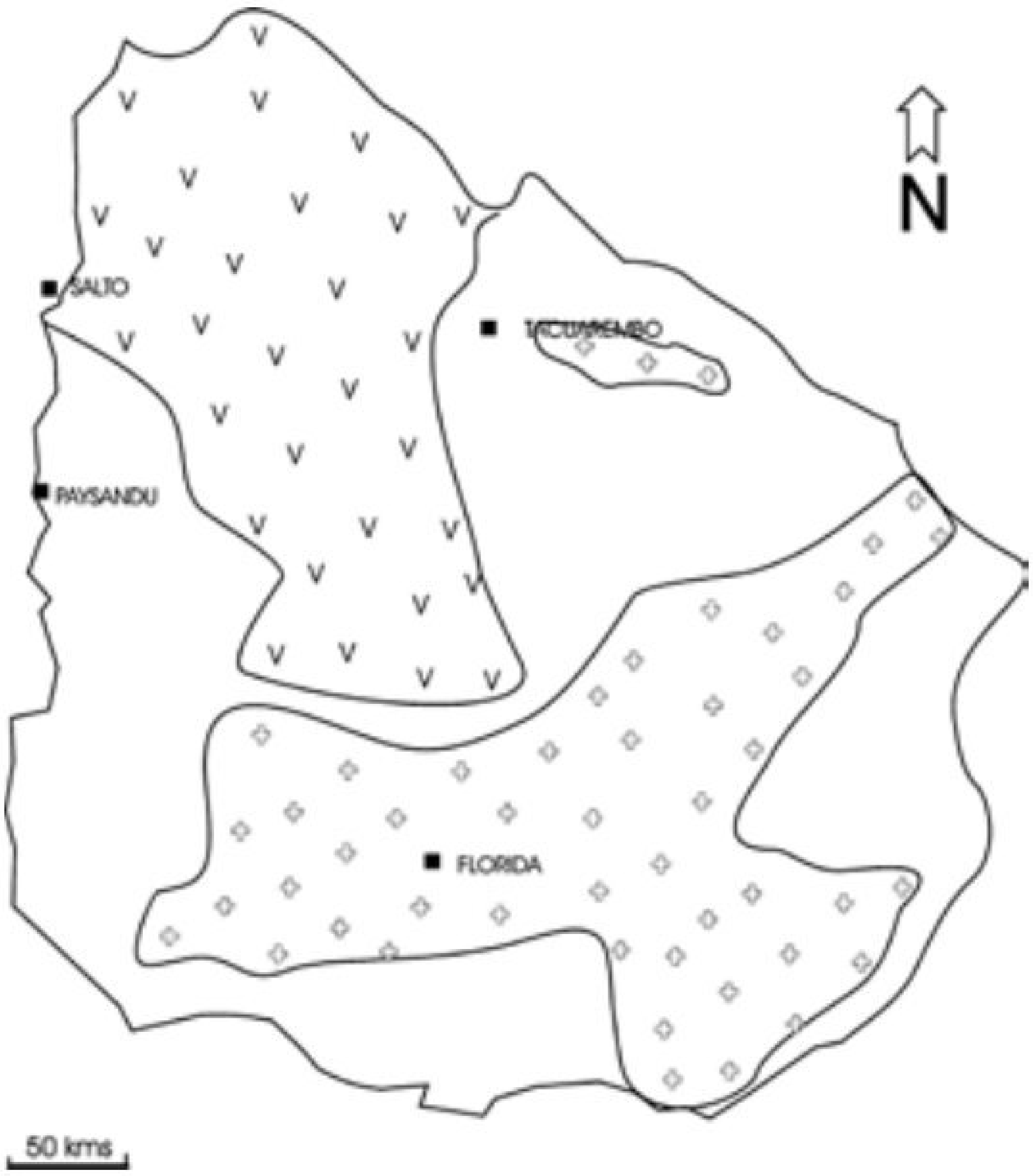

N
SALTO
TACUAREMBO
PAYSANDU
FLORIDA
50 kms

Figura 79. Área de los acuíferos de fisura

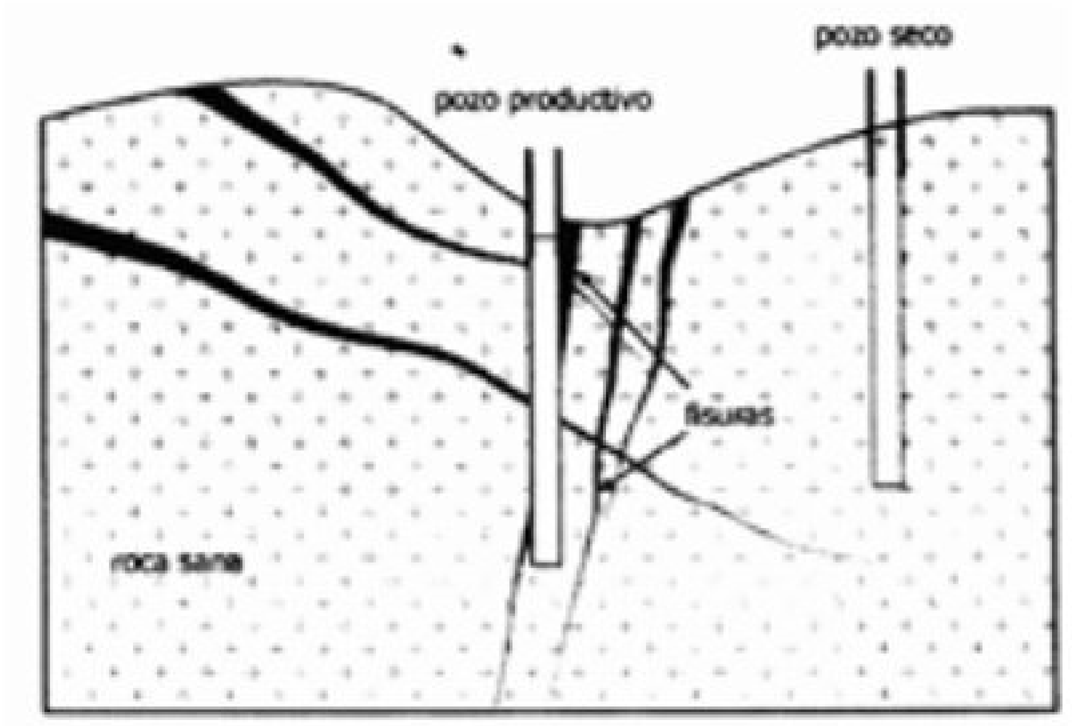

pozo seco
pozo productivo
fisuras
roca sana

Figura 80. Pozo productivo que atraviesa varias fisuras

En los acuíferos de fisura se dan condiciones especiales:

- No hay superficies piezométricas regionales.
- No es recomendable perforar a más de 70 m de profundidad.
- Los estudios puntuales no son extrapolables, ya que a muy corta distancia dan resultados diferentes (figura 81).
- Las zonas fracturadas son discontinuas.
- Los caudales normales son de 3000 a 5000 lts / hora.

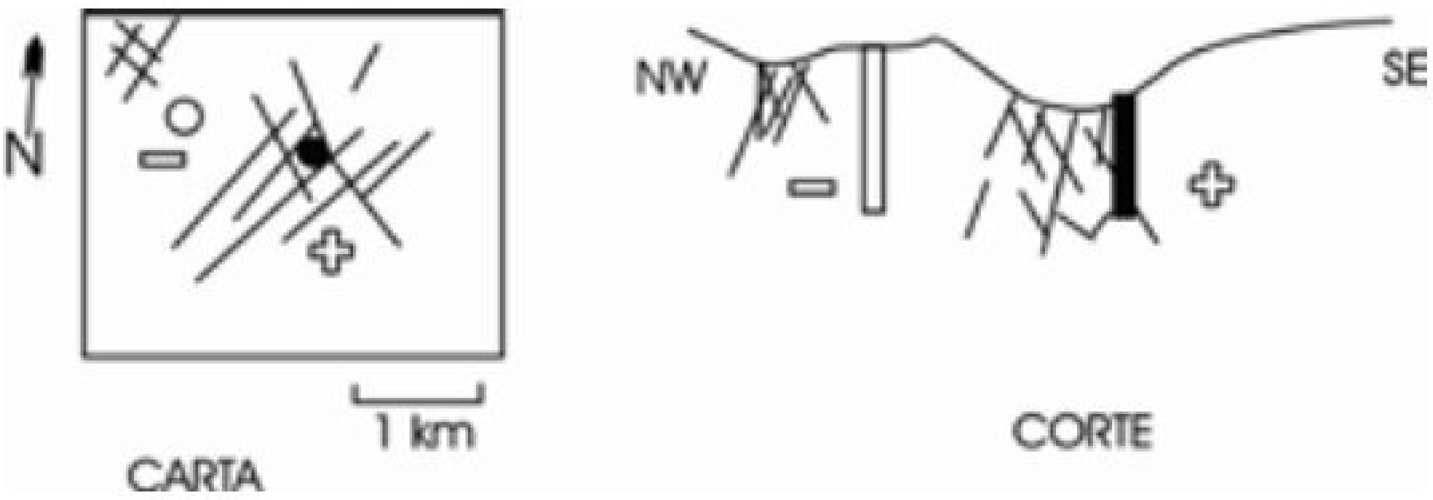


Figura 81. Carta y corte indicando pozos positivos y negativos

También pueden existir acuíferos fisurados libres (la mayoría), semiconfinados y confinados.

8.2.3. Acuíferos Kársticos

Los acuíferos kársticos se dan exclusivamente en rocas carbonatadas: calizas o dolomitas.

Se forman cavernas subterráneas por disolución de los carbonatos con la circulación de las aguas con CO_2

$$CO_3Ca + CO_2 + H_2O = (CO_3H)_2Ca \text{ soluble.}$$

En Uruguay son frecuentes, y se conocen abundantes casos, en un área reducida en la faja de rocas carbonatadas del borde oriental del Terreno Nico Pérez. Normalmente presentan caudales de 3000 lts/hora, pero son surgentes naturales y permiten mantener aguadas en períodos de seca.

No existe un relevamiento de las vertientes, ni siquiera en una carta geográfica, pero es un recurso natural importante que merece ser estudiado con detalle.

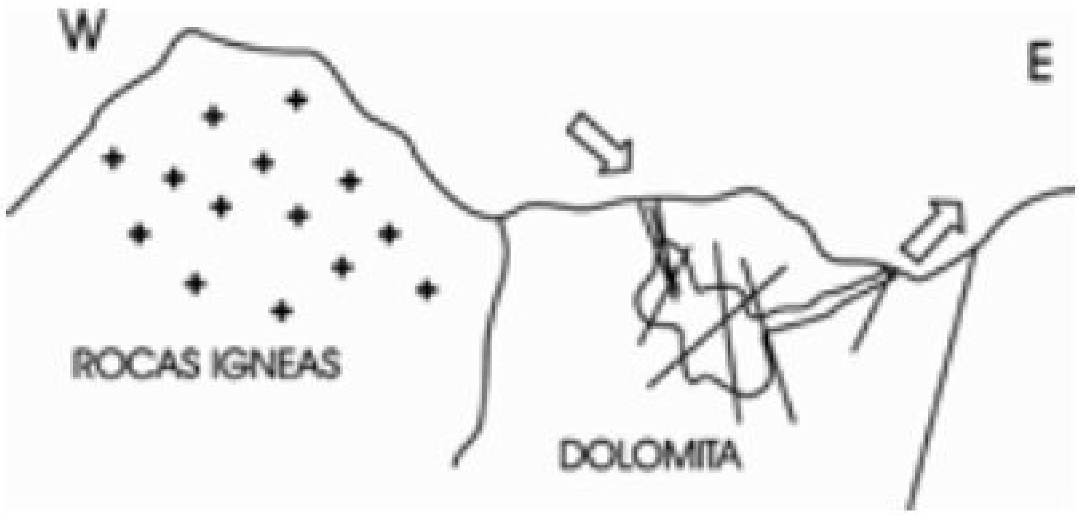


Figura 82. Acuíferos kársticos

De hecho, en Uruguay existe una extensa faja de calizas metamórficas en la mitad oriental del Terreno Nico Pérez, y es altamente probable que existan vertientes kársticas cada pocos kilómetros, debido a que se trata de una zona intensamente fracturada.

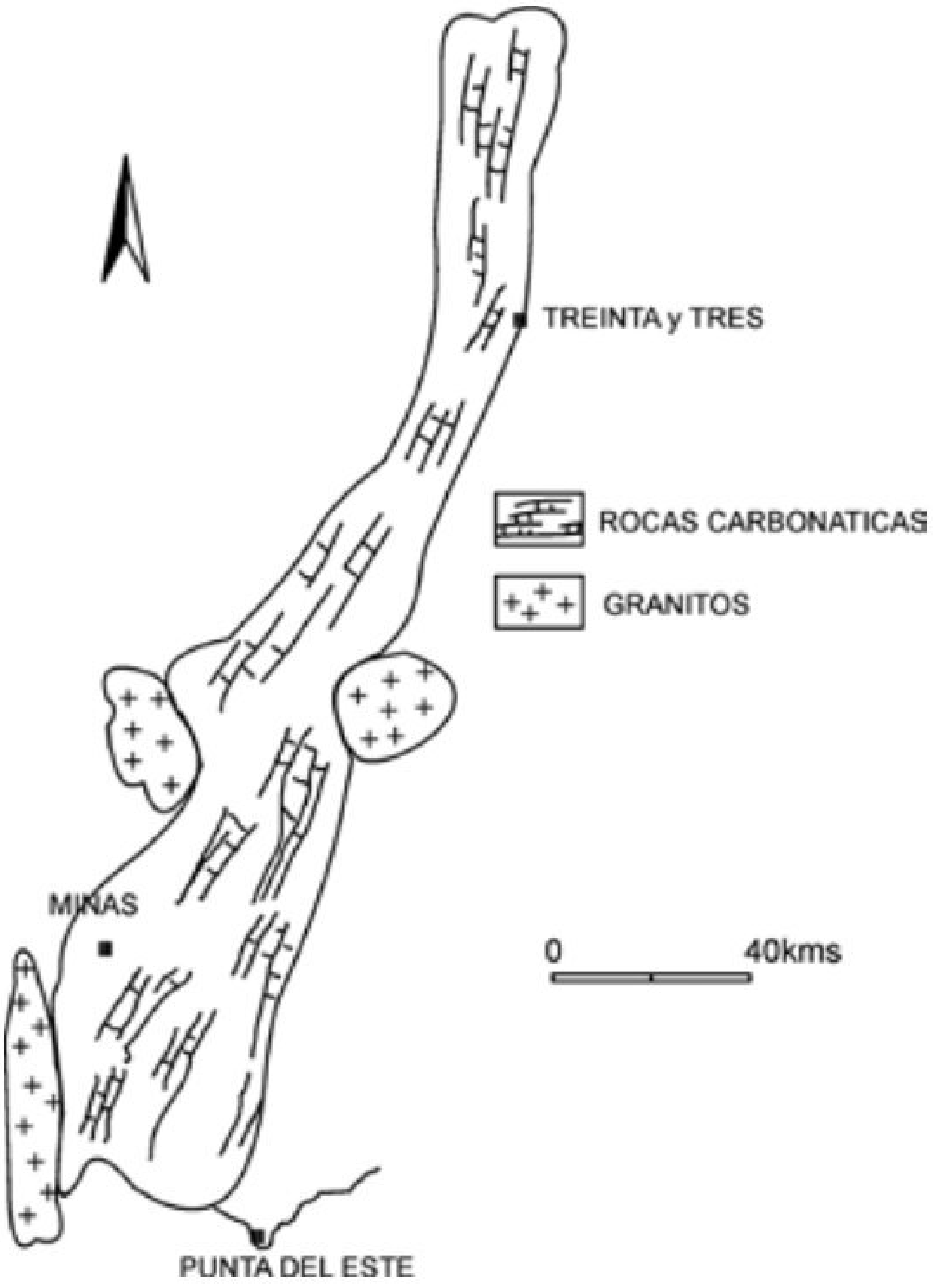

TREINTA y TRES
ROCAS CARBONATICAS
GRANITOS
MINAS
0
40kms
PUNTA DEL ESTE

Figura 83. Zonas con carbonatos en el Terreno Nico Pérez

8.3. Regionalización hidrogeológia del Uruguay (modificado de Morales, 1996)

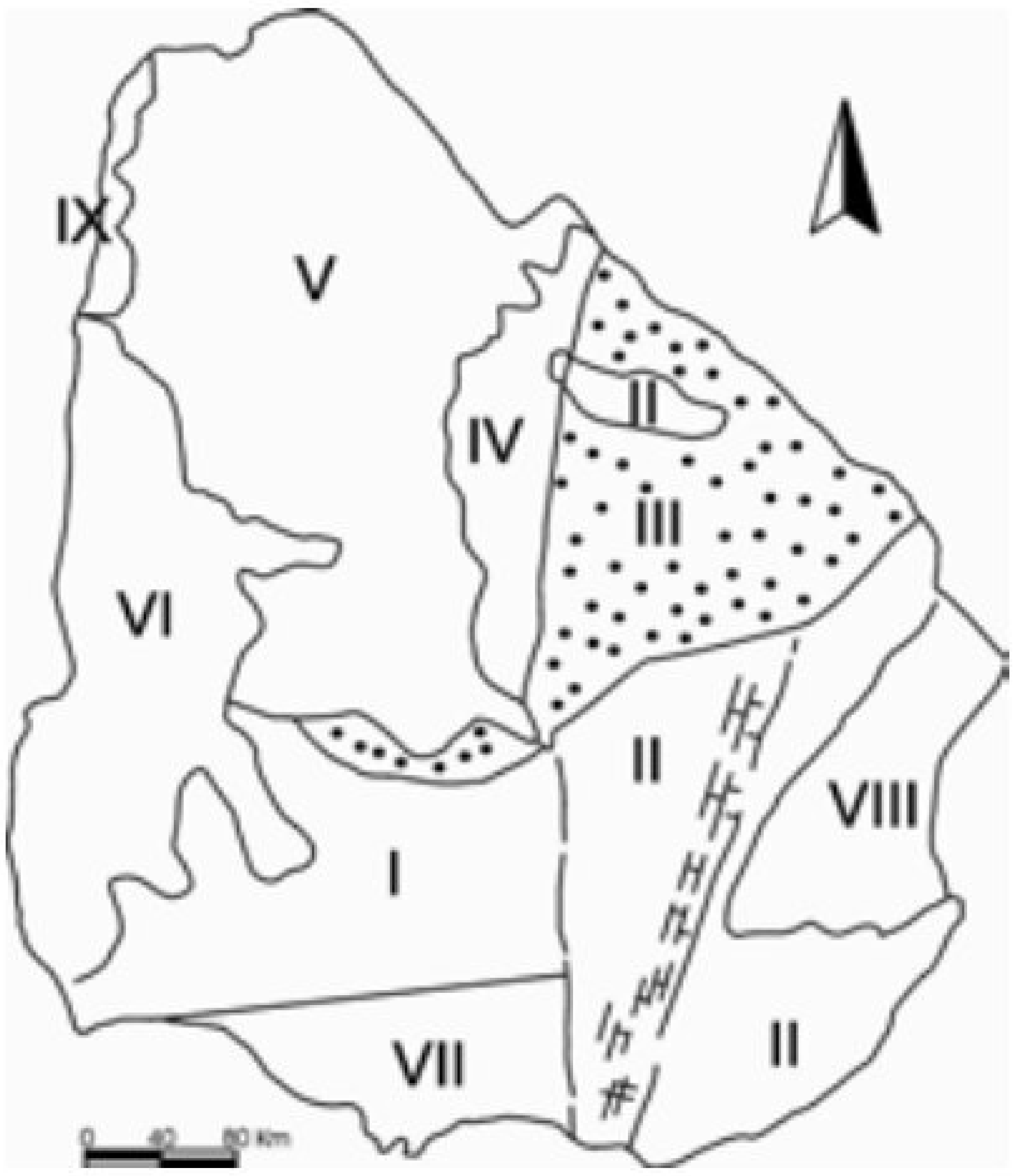


Figura 84. Regionalización hidrogeológica del Uruguay

8.3.1. Región I

Corresponde al área donde se desarrolla el Terreno Piedra Alta, conformado por rocas ígneas y metamórficas de edad precámbrica. Las distintas rocas que constituyen esta región solo posibilitan la existencia de los acuíferos de fisura de carácter local.

Las aguas subterráneas se mueven por fallas, fracturas y diaclasas abiertas, donde la permeabilidad secundaria asegura el libre tránsito de agua.

Según la capacidad teórica de almacenamiento de los acuíferos de fisura de esta región, las rocas pueden dividirse en:

- Rocas con *baja capacidad de almacenaje* (BCA): se trata de rocas con nula o muy baja frecuencia de fracturas.
- Rocas con *capacidad de almacenaje intermedia* (CAI): se agrupan aquí las rocas con baja resistencia a la deformación, quebradizas. Principalmente está constituido por rocas metamórficas de bajo grado (esquistos). Ejemplo: Fm. Paso Severino, Fm. Arroyo Grande, Faja Granitizada Florida.
- Rocas con *alta capacidad de almacenaje* (ACA): integrada principalmente por las rocas intrusivas ácidas como los granitos que, en general, presentan sistemas de fracturas de gran desarrollo. Ejemplo: Granito de la Paz.

8.3.2. Región II

En este caso, las litologías dominantes (ígneas y metamórficas) solo posibilitan la existencia de sistemas acuíferos de fisura: granito de Illescas, Fm. Valentines.

Dominan las rocas graníticas y los metamorfitos de grado alto, *facie granulita*. Estas litologías se caracterizan por el predominio de texturas granudas y, mineralógicamente, por la dominancia de cuarzo y feldespato, asociados a piroxenos en el caso de los metamorfitos de *facie granulita* (Fm. Valentines).

8.3.3. Región III

Se corresponde con las áreas de afloramiento de las sedimentitas que se depositaron durante el Devónico y el Gondwana. Las litologías dominantes son de origen clástico, existiendo esporádicos niveles de calizas asociadas a las Fms. Melo y Yaguarí.

Es posible el desarrollo de sistemas acuíferos porosos de carácter regional en aquellas estructuras donde la porosidad efectiva de la roca almacén lo permite.

8.3.3.1. Unidad acuífera Cerrezuelo

Las litologías que en ellas se desarrollan y la estructura geológica posibilitan el desarrollo de un sistema acuífero poroso de carácter local o regional. Puede constituir un acuífero libre cuando aflora o confinado de carácter local.

8.3.3.2. Acuicludo Cordobés

La sedimentación de la base está conformada por una sucesión de arcillas grises claras intercaladas con limos y areniscas muy finas, micáceas arcillosas. Presentan una porosidad total muy alta (mayor cantidad de microporos, por lo que el agua está fuertemente retenida. Por esto se comporta como acuicluído).

8.3.3.3. Unidad acuífera La Paloma

Presenta litologías arenosas de granos finos a medios, arcillosos, micáceos de color violáceo. Presentan la posibilidad de permitir la acumulación y circulación de agua.

8.3.3.4. Acuitardo San Gregorio

Presenta una gran diversidad de granulometrías, pero todas las litologías groseras, conglomerados y diacmictitas tienen una matriz constituida por arcillas y linos como material cementante. Este impide o dificulta la acumulación y libre circulación del agua.

8.3.3.5. Unidad acuífera Tres Islas

En áreas donde la formación está representada por depósitos arenosos limpios puede constituir un acuífero localizado de importancia. Donde aflora o constituye el subsuelo no cumple con la condición de ser aprovechable, pues el agua presenta pirita, que es un sulfuro de hierro que actúa como contaminante.

8.3.3.6. Acuicludo Melo

Dominan netamente las granulometrías finas con abundante contenido de esmectitas y los colores grises. Se asume la clasificación de acuicluído ya que las rocas pueden estar saturadas en agua, pero no es posible la extracción mediante bombeo.

8.3.3.7. Unidad acuífero-acuitardo Yaguarí

Conformada por litologías arenosas finas, en estratos tabulares de gran extensión intercalados con estratos políticos, siendo el color rojo dominante en todo el paquete sedimentario. Las características que ubican a estos sedimentos en el grupo de las arenas limosas es el factor que define su ubicación entre un acuífero local o semiregional de muy baja capacidad y un acuitardo para esta unidad.

8.3.3.8. Unidad acuífera Buena Vista

Integrada dominantemente por areniscas finas a gruesas con escasas intercalaciones pelíticas, conglomerados finos, clastos sostén y brechas intraformacionales. Puede considerarse como un potencial acuífero local o semiregional de mediana a alta capacidad.

8.3.4. Región IV

8.3.4.1. Unidad acuífera Batoví Dorado

Este acuífero presenta diferencias en su comportamiento hidrogeológico. Las mismas están estrechamente relacionadas con la composición litológica de las unidades perforadas:

- Fm. Rivera: potencia 50m.
- Fm. Tacuarembó: potencia 100 m.
- Fm. Cuchilla Ombú: potencia 60 m.

La Fm. Cuchilla de Ombú es la unidad basal del grupo. Se apoya en discordancia sobre la Fm. Yaguarí. Se trata de areniscas finas y medias, de poca coherencia y colores neutros a oxidantes claros. Su potencia máxima fue estimada en 60 m.

La Fm. Tacuarembó se apoya discordantemente sobre la Fm. Cuchilla de Ombú. Litológicamente está conformada por sedimentitas de granulometría fina. Las mismas se describen como areniscas finas bien seleccionadas, de matriz arcillosa con intraclastos pelíticos. La potencia estimada es de 100 m.

La Fm. Rivera se trata de areniscas finas a medias, de granos bien redondeados y bien seleccionados, de mineralogía cuarzo feldespática y poco cemento arcilloso de naturaleza caolinítica, estratificación entrecruzada de tipo planar y color rojo naranja. Su ambiente de formación se corresponde a un clima continental desértico, siendo el viento el agente de transporte. Su potencia no supera los 50 m.

8.3.5. Región V

Presenta el mayor grado de homogeneidad desde el punto de vista litológico. Se caracteriza por estar constituida por una superposición de derrames basálticos de diferente espesor y diferentes composiciones químicas. La composición química y la estructura interna de cada colada juegan un rol muy importante en el comportamiento hidrogeológico de la zona.

De acuerdo con la génesis de la roca dominante en la zona, el sistema acuífero es de fisura, pero la composición química de cada colada, que influye en el grado de meteorización que alcanza la roca, combinada con el espesor y la estructura interna de cada derrame, juegan un papel muy importante en las posibilidades de acumulación y circulación de agua subterránea en el sistema de fisuras en esta región. Así los mejores resultados en la captación de agua subterránea se obtienen en aquellas áreas donde el nivel vacuolar de la colada es resistente a la meteorización.

8.3.6. Región VI

Comprende el área de afloramientos y las zonas del litoral w del país donde las sedimentitas del Cretácico Superior conforman el subsuelo. Es una zona donde las posibilidades hidrogeológicas son buenas, ya que el grupo Paysandú aflora o constituye el yaciente de la Fm. Fray Bentos.

8.3.6.1. Unidad acuífera Guichón:

Se trata de un paquete areniscoso donde predominan las areniscas finas y medias de selección regular, estratificación paralela con tendencia a tabular poco marcada.

Los conglomerados y las areniscas conglomerádicas son las que potencialmente permiten clasificarlo como un acuífero libre semiregional de mediana a baja capacidad de almacenamiento.

8.3.6.2. Unidad acuífera Mercedes

Está dominantemente integrado por rocas psefíticas, descritas como conglomerados o areniscas conglomerádicas gravillosas, que evolucionan en una secuencia estrato y granodecreciente hacia el contacto con el miembro superior. Este es dominantemente psamítico, donde predominan areniscas medias, mal seleccionadas cuarzosas, con escasa matriz arcillosa, parcialmente silicificadas. Es la unidad que potencialmente tendría los mejores valores de porosidad y sería el acuífero regional más importante de esta zona.

8.3.6.3. Unidad acuífera Asencio

Este acuífero de carácter local a semiregional puede actuar como libre o confinado, siendo mayor su productividad cuando se encuentra en esta última condición. Las rocas que lo conforman se definen como areniscas finas a medias, cuarzosas con granos subredondeados, cemento arcilloso, el cual se hace más abundante hacia la base.

8.3.7. Región VII

Comprende al paquete sedimentario que rellena la fosa tectónica de Santa Lucía.

Columna	Estratigráfica	Hidrogeológica
Cenozoico	Fm. Dolores	Acuitardo
	Fm. Libertad	Acuitardo
	Fm. Chuy	Acuífero
	Fm. Raigón	Acuífero
	Fm. Camacho	Acuífero
	Fm. Fray Bentos	Acuitardo
Cretácico superior	Fm. Asencio	Acuífero
	Fm. Mercedes	Acuífero
	Fm. Guichón	Acuífero
Cretácico inferior	Fm. Migues	Acuitardo - Acuífero

8.3.7.1. Acuitardo-acuífero Migues

Su perfil litológico se caracteriza por la predominancia de areniscas finas arcillosas con frecuentes intercalaciones pelíticas y esporádicos niveles conglomerádicos, las cuales determinan para estos sedimentos una baja permeabilidad. Es por ello que se comporta en la mayoría de las zonas donde aflora como un acuitardo.

8.3.7.2. Unidad acuífera Mercedes

La roca almacén está constituida por litologías arenosas conglomerádicas, se estaría frente a una estructura acuífera regional.

8.3.7.3. Acuitardo Fray Bentos

La clasificación de acuitardo se fundamenta en las características texturales predominantes en esta unidad. Neta preponderancia de granulometrías muy finas, descritas como pelitas y areniscas muy finas macizas, con contenido de arcillas.

8.3.7.4. Unidad acuífera Camacho

Paquete arenoso de grano fino a medio, bien redondeado, cuarzoso con escaso cemento arcilloso, con unos 15 m de potencia máxima. Se categoriza como un acuífero poroso libre o semiconfinado, de carácter local a semiregional de mediana capacidad.

8.3.7.5. Unidad acuífera Raigón

Se destaca por su granulometría, tipo y cantidad de material cementante, potencia, estructura geológica y posición topográfica y, como la unidad con la mayor capacidad para constituirse en el acuífero regional más importante de esta zona.

8.3.7.6. Unidad acuífera Chuy

Acuífero de carácter local de mediana capacidad. Las litologías más comunes están representadas por areniscas medias y gruesas con estratificación paralela, cuarzo feldespática, granos redondeados a subredondeados, intercalada con areniscas friables. En la base se intercalan pelitas arenosas y areniscas arcillosas de color verde.

8.3.7.7. Acuitardo Libertad

Se trata de rocas pelíticas bien seleccionadas (loess) y mal seleccionadas (lodolitas). Se clasifica por la litología en un acuitardo.

8.3.7.8. Acuitardo Dolores

Conformado por una sucesión de rocas pelíticas, a veces algo arenosas de color pardo y origen continental. Rellena las terrazas entalladas por cursos de agua actuales en planicies post Fm. Chuy. Como presenta composición textural similar a Fm. Libertad se asume que su comportamiento es de acuitardo.

8.3.8. Región VIII

Se corresponde con el área de influencia de la fosa tectónica de la laguna Merín.

Columna	Estratigráfica	Hidrogeológica
Pleistoceno	Fm. Dolores	Acuitardo
	Fm. Chuy	Acuífero

8.3.8.1. Unidad acuífera Chuy

Acuífero de carácter local de mediana capacidad. Las litologías más comunes están representadas por areniscas medias y gruesas con estratificación paralela, cuarzo feldespática, granos redondeados a subredondeados, intercalada con areniscas friables y en la base se intercalan pelitas arenosas y areniscas arcillosas de color verde.

8.3.8.2. Acuitardo Dolores (ver 8.3.7.8.)

8.3.9. Región IX

Se corresponde desde el punto de vista hidrogeológico con el área de influencia del acuífero Salto.

Columna	Estratigráfica	Hidrogeológica
Plioceno	Fm. Salto	Acuífero
Oligoceno	Fm. Fray Bentos	Acuitardo
C. Superior	Fm. Guichón	Acuífero
C. Inferior	Grupo Arapey	Acuífero

8.3.9.1. Acuífero Salto:

acuífero poroso más importante para esta zona (porosidad 0,2 y T= 50 m^2/día)

8.4. Explotación

El agua subterránea es un recurso mineral renovable de modo que, si se explota racionalmente, se puede aprovechar por largos períodos.

La prospección de agua subterránea exige buena formación geológica. Si bien no es función del ingeniero agrónomo, es importante que domine algunos conceptos para evitar manejos equivocados:

- En los acuíferos porosos la ubicación exacta no es crítica porque se comporta como un acuífero isótropo y homogéneo en la mayoría de los casos.
- En los acuíferos de fisura la ubicación es crítica y no es conveniente proponer más de 70 metros de profundidad porque las fisuras se cierran.

8.4.1. Obras de captación

Pueden ser convencionales o no convencionales. Dentro de las convencionales se encuentran los pozos brocales y los pozos artesianos.

8.4.1.1. Pozos brocales

Son pozos de gran diámetro (0,8 a 1,2 m en general), con paredes forradas de ladrillos, donde el terreno es deleznable y las paredes desnudas si la roca es autoportante.

El brocal (figura 85) es, en realidad, la parte saliente de la obra —con una altura aproximada al metro— que conviene cubrir herméticamente. Se debe tener gran cuidado en forrar y dejar impermeable la zona de roca descompuesta y de suelo para evitar la contaminación del acuífero.

La principal ventaja de este tipo de obra es que opera bien en acuíferos pobres. Aunque la velocidad de recarga sea lenta se puede almacenar mucha agua.

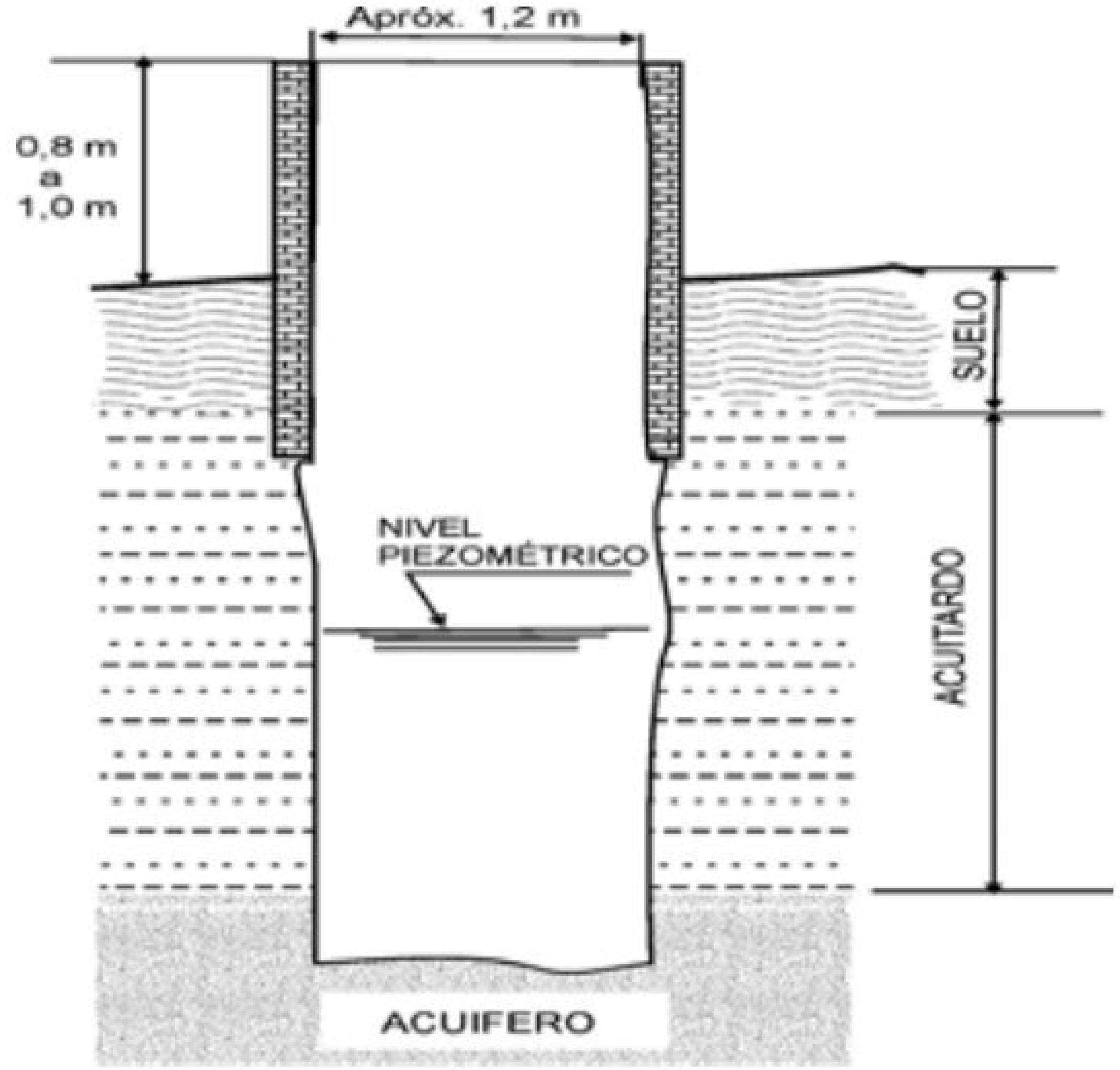

Apróx. 1,2 m
0,8 m
a
1,0 m
SUELO
NIVEL
PIEZOMÉTRICO
ACUITARDO
ACUIFERO

Figura 85. Pozo brocal

8.4.1.2. Pozos artesianos

Son perforaciones de pequeño diámetro (tres a diez pulgadas) realizados con máquinas perforadoras (figura 86). La mayoría tienen entre cuatro y seis pulgadas.

Se recubren interiormente con caños de PVC o hierro sin costura.

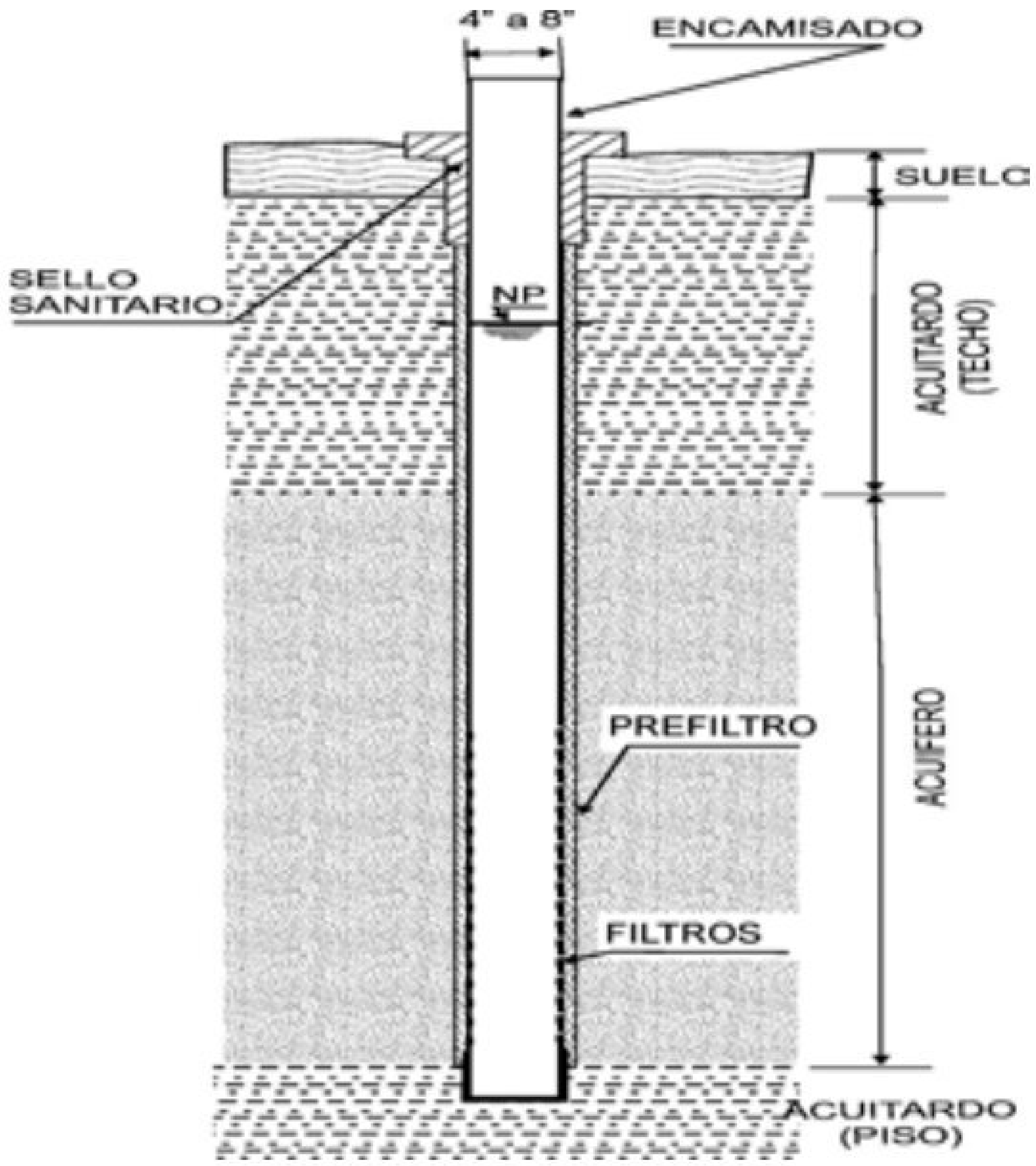

4" a 8"
ENCAMISADO
SUELO
SELLO
SANITARIO
NP
ACUITARDO
(TECHO)
PREFILTRO
ACUIFERO
FILTROS
ACUITARDO
(PISO)

Figura 86. Pozo artesiano

8.4.1.3. Sello sanitario

El sello sanitario es de enorme importancia, ya que el agua que se extrae de una perforación puede estar contaminada, tanto sea por el acuífero o por el ingreso de agentes contaminantes.

Una de las posibles vías de contaminación puede generarse en la superficie donde se encuentra el pozo. Para evitarlo, la boca del pozo debe estar sellada (si no está en uso) o tapada, de manera que no permita la contaminación desde la superficie terrestre. Es imprescindible para el adecuado uso y manejo del agua subterránea que el pozo tenga un sello sanitario —una argamasa (mezcla de materiales) impermeable que se coloca en el espacio anular existente entre el terreno perforado y el tubo del pozo— desde la superficie hasta una profundidad que no interfiera con la captación de agua, evitando así la contaminación.

La argamasa (pasta o barro), luego de colocada, se endurece e impide la contaminación o ingreso de cualquier sustancia que afecte la calidad o pureza del agua. Una pasta muy efectiva, y la más utilizada, es la arcilla que, al ser muy impermeable, impide el pasaje de cualquier agente contaminante. La bentonita le confiere flexibilidad a la mezcla y la cal opera como bactericida o desinfectante. El cemento es otra pasta que se utiliza para realizar el sello sanitario.

Con esto se evita el posible acceso de agentes contaminantes de la superficie del terreno y, además, el ingreso de otros estratos de acuíferos de los que no se sepa el estado de calidad de su agua.

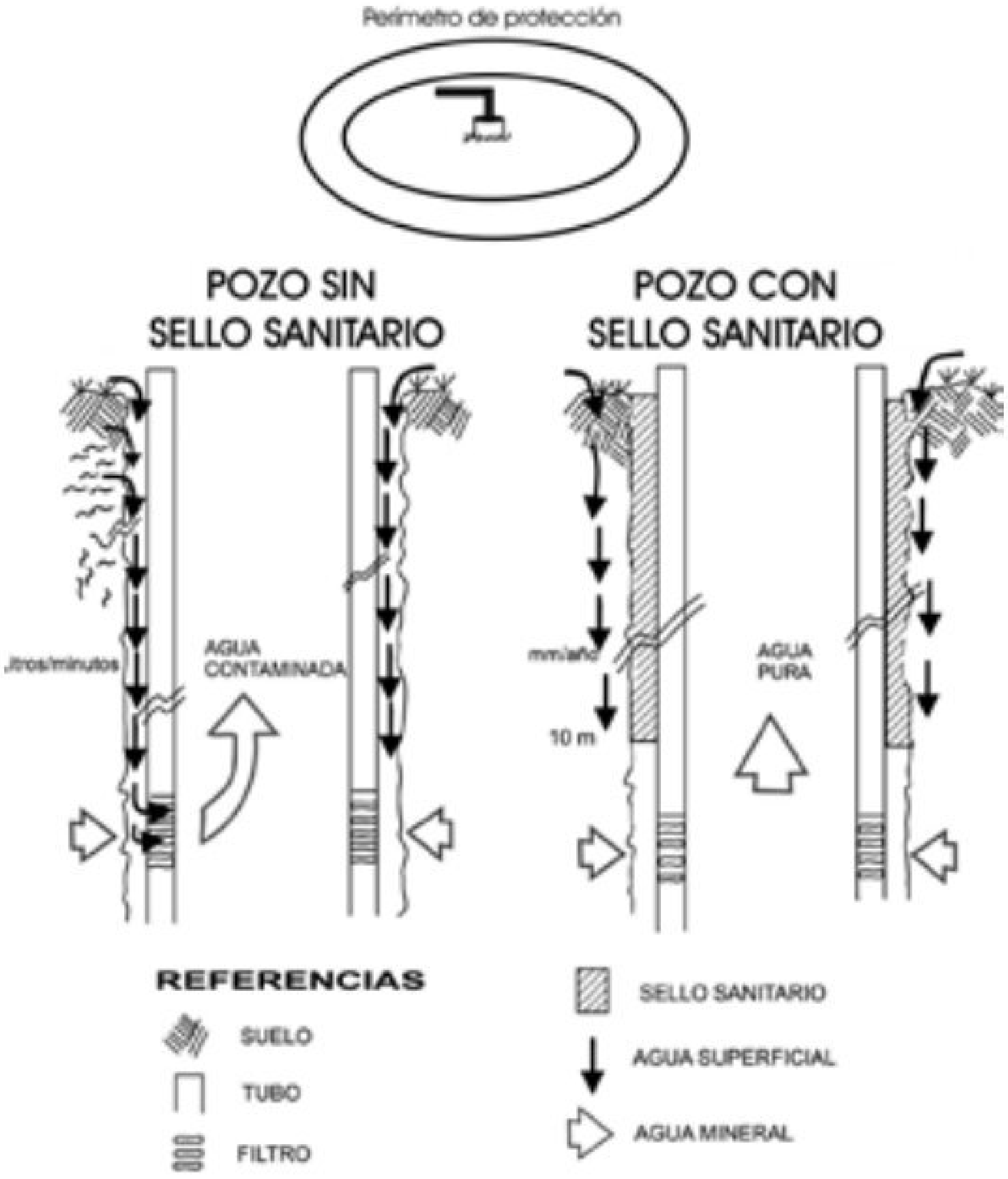

Perímetro de protección
POZO SIN SELLO SANITARIO
POZO CON SELLO SANITARIO
litros/minutos
AGUA CONTAMINADA
mm/año
10 m
AGUA PURA
REFERENCIAS
SUELO
TUBO
FILTRO
SELLO SANITARIO
AGUA SUPERFICIAL
AGUA MINERAL

Figura 87. Sello sanitario y perímetro de protección

8.4.1.4. Perímetro de protección del pozo

Es un área próxima al pozo en la que no pueden realizarse acciones que eventualmente sean contaminantes. Cuando se esté planificando la realización de una perforación para captar aguas subterráneas es de enorme importancia contemplar la realización del sello sanitario (que es obligatorio) y también la ubicación de este, ya que es necesario disponer de un área para proteger el pozo de las posibles contaminaciones superficiales, restringiendo las actividades en esa área, más aún en los pozos que se extrae para suministro de agua potable.

El perímetro de protección tendrá una extensión y forma que dependerá de la susceptibilidad que tenga el terreno para el ingreso de posibles agentes contaminantes, de cómo sea el movimiento del acuífero y las propiedades del mismo. Para establecer el perímetro de protección es necesario obtener la mayor información posible del terreno, así como de la geología donde se realizará la perforación, y elegir el modelo adecuado a la situación (por ejemplo, muy común en tambos).

De todos modos, aun efectuando una perforación teniendo en cuenta todas las medidas de prevención para captar aguas subterráneas, debemos realizar periódicamente análisis del agua extraída para tener la certeza de que la calidad de la misma no ha cambiado.

8.4.1.5. Caudal específico

Es el caudal obtenido por metro de descenso del nivel dinámico.

- *Nivel estático (NE):* es el nivel existente antes de bombear.
- *Nivel dinámico (ND):* es el nivel piezométrico cuando se alcanza el régimen de explotación.
- *Descenso: (S):* es la diferencia entre nivel estático y nivel dinámico.

Luego de conocido el caudal específico se puede calcular el **caudal de bombeo** para mantener el nivel dinámico a determinada profundidad. El descenso máximo permitido debe respetar que la bomba no succione aire y que todos los filtros queden bajo el agua.

8.4.1.6. Gestión del recurso

Se debe evitar la sobreexplotación a cualquier costo, ya que ésta genera perjuicios tales como obstrucción de filtros y quema de la bomba.

El régimen de bombeo comprende el número de horas diarias en que puede funcionar la extracción contemplando un período de recuperación. Lo normal son hasta 18 horas de bombeo y 6 de recuperación para evitar la precipitación de sales.

8.5. Calidad de las aguas

Desde el punto de vista agronómico es importante conocer la calidad de las aguas, especialmente el contenido en Ca^{++} y Mg^{++} que genera problemas en el riego; la conductividad en micromoles/cm, que genera riesgos de salinización, y la relación de absorción del Na^{+} que genera salinización.

La calidad de agua para riego debe atender:

- Concentración iónica para riesgo de salinidad.
- Relación del sodio con los cationes para riesgo de alcalinidad.
- La posibilidad de sustancias iónicas.
- Dureza para el riesgo de obstrucción.
- Oligoelementos.

Las aguas para riego se clasifican según:

1. Riesgo de salinidad:
    < 500 ppm sin problema.
    500 – 2000 ppm problema controlable.
    > 2000 ppm problema potencial severo.
2. Riesgo de sodicidad:
    RAS < 10 sin problema.
    10 – 18 problema potencial moderado.
    > 18 problema severo.
3. Riesgo de toxicidad:
    Na (meq/l) < 3; Cl (meq/l) < 2; HCO3 (meq/l) < 1,5
    B (ppm) < 1; NO3 (ppm) < 5.
4. Riesgo de obstrucción:
    Materiales suspendidos < 50 ppm,
    pH < 7,
    Sólidos disueltos < 500 ppm.
    Valores normales según FAO.
    pH 6 – 8,5
    SAR 0 – 15

$$\mathrm{SAR} = \frac{\text{meq/lt Na}}{\sqrt{\tfrac{1}{2}(\text{meq/lt Ca}^{++} + \text{meq/lt Mg}^{++})}}$$

Diagrama de clasificación de aguas para riego		
	ppm	meq/lt
HCO_3	0-600	0-10
Cl^-	0-1000	0-30
SiO^-_4	0-900	0-20
Ca^{++}	0-400	0-20
Mg^{++}	0-60	0-5
Na^+	0-920	0-40
NO^-_3	0-10	0-0,16
B^{+++}	0-2	0
NH^-_4	0-5	0-0,28

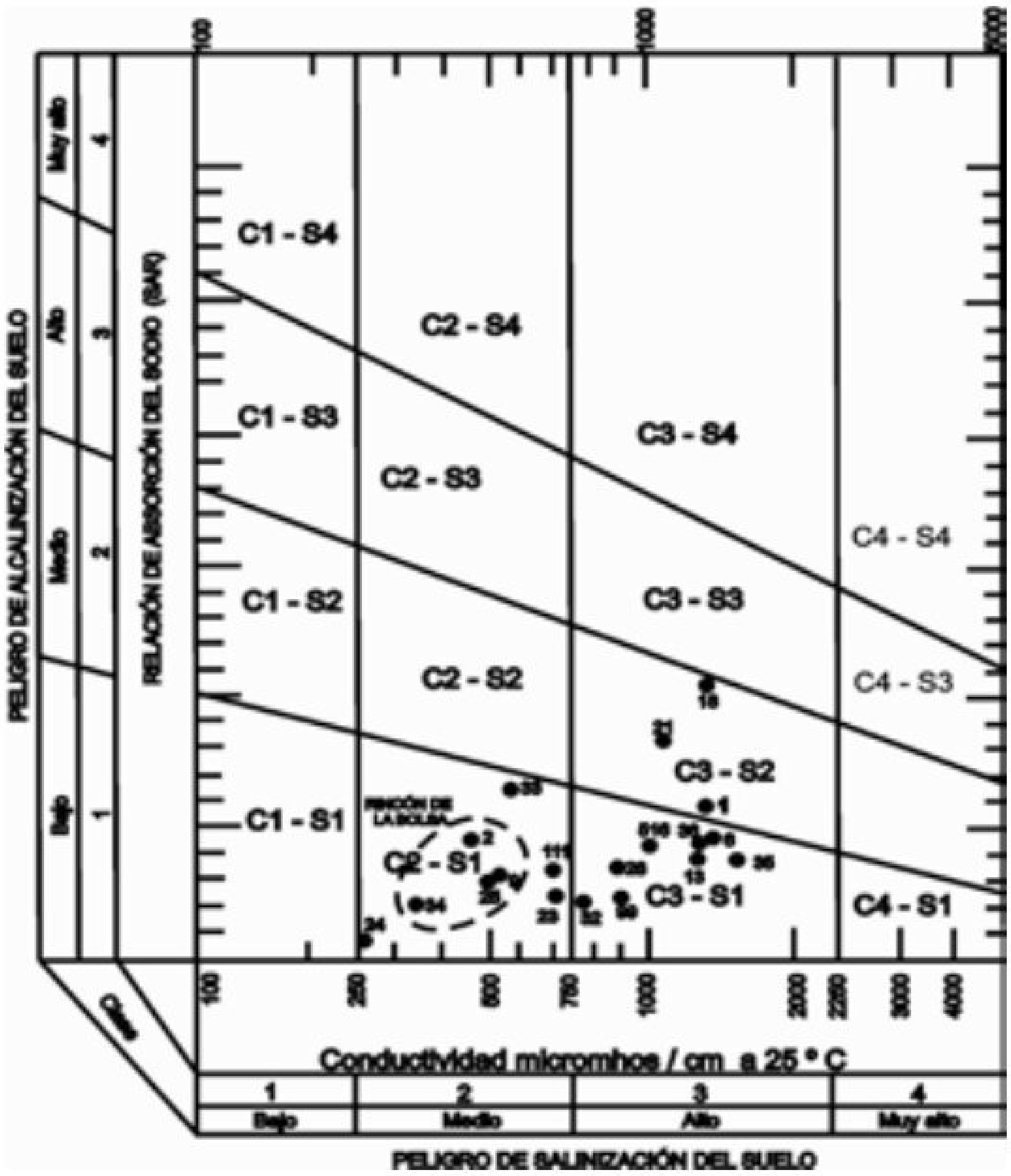


Figura 88. Clasificación de aguas para riego

Un panorama general sobre posibilidades de obtención de aguas subterráneas, y cierta estimación de la calidad, se presenta en Heinzein *et al.* (2003). En la tabla 17 se exponen datos de veinte perforaciones indicadoras de las características de la mayoría de los acuíferos.

Tabla 17. Características de los diferentes acuíferos

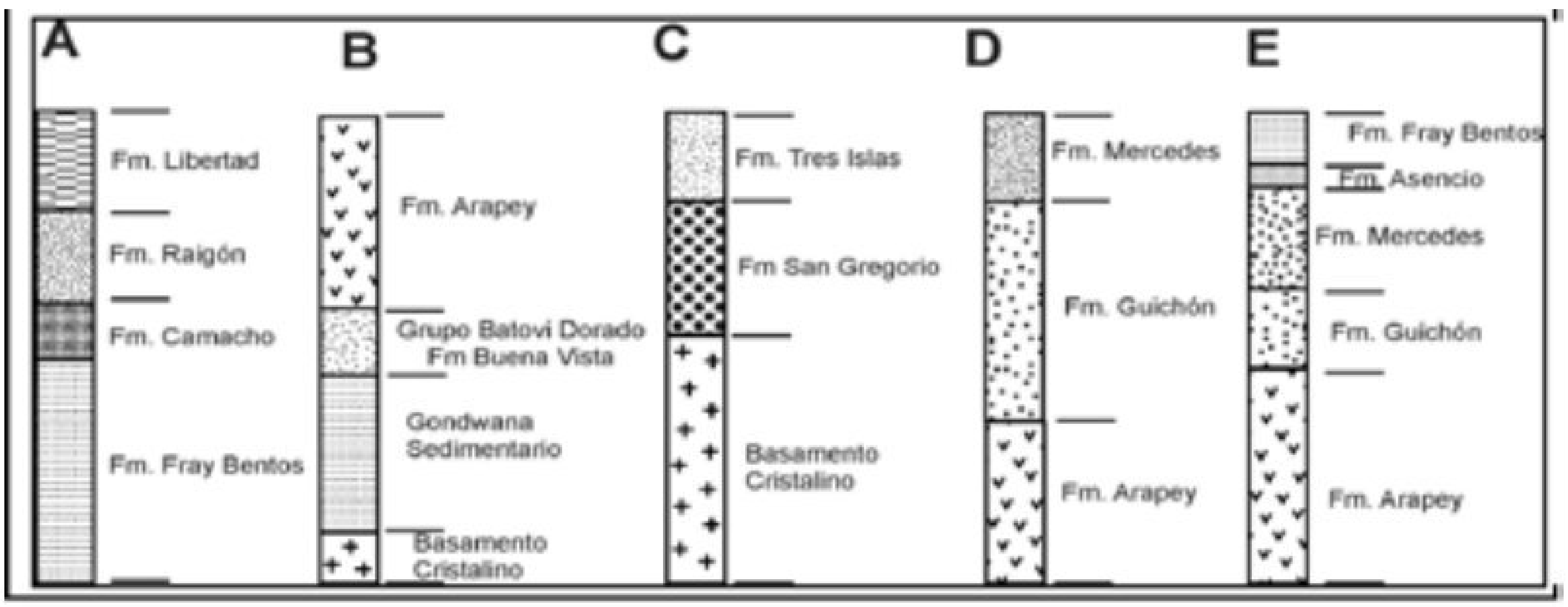
	Acuífero edad	Profundidad (m)	NE (m)	Caudal esp.	Residuo seco
1	Ki ß	36	27	1,4	250
2	Ki ß	225	24	0,06	2100
3	Ki ß	35	17	0,4	400
4	Ki ß	23	16	1	420
5	Ki ß	75	9	0,3	150
6	TPA	25	4,4	1	950
7	TPA	25	8	0,7	1020
8	TPA	18	7,5	0,6	610
9	TNP	25	12	1,9	300
10	TCD	27	2,5	0,3	750
11	TCD	26	12	0,3	425
12	Yaguarí	30	1	0,07	790
13	Yaguarí	50	4,5	0,01	420
14	Yaguarí	46	6	0,07	500
15	Tacuarembó	57	10	0,2	200
16	Ks Mercedes	55	22	3	525
17	Ks Mercedes	125	16	1,4	600
18	Fosa Santa Lucía	30	17	0,14	------
19	Melo	176	23	0,4	420
20	Devónico	303	72	1	1300

El panorama general indica caudales específicos de < 1 m3/h/m, lo que permite plantear caudales raramente superiores a 5000 l/ h, con la excepción notoria del acuífero Raigón y los pozos perforados en el acuífero Guaraní.

8.6. Ejercicios

1. Defina el concepto físico de porosidad.
2. Defina el concepto físico de permeabilidad.
3. Defina el concepto físico de gradiente.
4. ¿Qué relación existe entre porosidad y permeabilidad?
5. ¿Qué factores condicionan la porosidad de una roca sedimentaria?
6. ¿Qué factores condicionan la permeabilidad de una roca sedimentaria?
7. Dos perforaciones (A y B) están separadas 550 m. El pozo A tiene 32 m de profundidad y está ubicado a cota 50m, el pozo B está ubicado a cota 68 m y posee 36 m de profundidad. El nivel estático de A es 10 m y el de B 15 m.
    a. ¿El gradiente hidráulico natural es AB o BA?
    b. Suponga que el subsuelo está compuesto por limo: ¿a qué velocidad se mueve el agua subterránea?
    c. ¿Y si el subsuelo estuviese compuesto por arena limosa?

8. Defina dos situaciones reales donde una o más formaciones se comportasen como acuíferos libres y semiconfinados. ¿Cuáles son las unidades acuíferas y cuáles las unidades confinantes?
9. En la siguiente figura se presentan perfiles esquemáticos de perforaciones en el Uruguay. Se solicita que defina:
   a. ¿Cuáles de las unidades que aparecen en cada pozo se comportarían como acuíferos porosos?
   b. Cómo las clasificaría en función de su grado de dependencia con el ciclo superficial: ¿libre o semiconfinado?
   c. Consultando la Carta Geológica del Uruguay, ubique la región donde estaría ubicada cada una de las perforaciones.


A
Fm. Libertad
Fm. Raigón
Fm. Camacho
Fm. Fray Bentos
B
Fm. Arapey
Grupo Batovi Dorado
Fm Buena Vista
Gondwana
Sedimentario
Basamento
Cristalino
C
Fm. Tres Islas
Fm San Gregorio
Basamento
Cristalino
D
Fm. Mercedes
Fm. Guichón
Fm. Arapey
E
Fm. Fray Bentos
Fm. Asencio
Fm. Mercedes
Fm. Guichón
Fm. Arapey

10. Realice un perfil esquemático que muestre un acuífero fisurado y señale la ubicación de un pozo fértil (+) y uno estéril (-). Señale, además, el área de recarga del acuífero.
11. ¿Qué diferencias existen entre un acuífero libre y un acuífero confinado?
12. Realice un corte esquemático en donde se observe un acuífero poroso al que le fuera realizado una perforación surgente. Represente el área de recarga y el nivel piezométrico en el acuífero.
13. Un brocal de 1,2 m de diámetro y 22 m de profundidad se vacía completamente en 2h 40' con una bomba de 3,8 m^3/hora. ¿Cuál era el nivel piezométrico original?
14. Un brocal de 1,4 m de diámetro y 25 m de profundidad, con NE de 8 m, se vacía completamente al bombearlo en 3h 20'. Para volver a su nivel original necesita 15 horas.
    a. ¿Cuál es el caudal de la bomba?
    b. ¿Cuál es el caudal aportado por el acuífero?

Bibliografía recomendada (por orden de importancia):

ORTIZ, Alejandra (2009) *Glosario de geología e hidrogeología*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

MORALES, Héctor Luis (1996), *Introducción a la hidrogeología*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

HEINZEN *et al.* (2003), *Mapa hidrogeológico del Uruguay a escala 1/1.000.000*. Montevideo: Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE).

BOSSI, Jorge, Héctor Luis MORALES (1997), *Perspectivas concretas de agua subterránea en los alrededores del Centro Regional Sur*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

CORREU, Guillermo (1974), *Manual para el alumbramiento de aguas subterráneas*. México: Ed. FIRA.

FAO (1981) *Contaminación de las aguas subterráneas: tecnología, economía y gestión*. Instituto Geológico y Minero de España; Instituto Geológico de Massachusetts. Ed. FAO.

GONZÁLEZ Alice, Nicolás REZZANO, Enrique INDARTE (2008), *Guía de gestión integral de aguas en establecimientos lecheros: diseño, operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento de efluentes*. Montevideo: MTOP-DINAMA-CONAPROLE-IMFIA.

HAUSMAN, Abrao (2003), *Aspectos del comportamiento de los acuíferos fracturados*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGÍA (MIE), DIRECCIÓN NACIONAL DE MINERÍA Y ENERGÍA (Dinamige) (1986), *Elementos del ciclo hidrológico. Memoria explicativa de la Carta Hidrogeológica escala 1/2.000.000*. Montevideo: MIE.

MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS (MTOP), DIRECCIÓN NACIONAL DE HIDROGRAFÍA (DNH) (2001), *Primer Taller del Acuífero Raigón. Gestión sostenible de recursos de aguas subterráneas*. Montevideo: MTOP.

BIZE, Jean, Lucien BOURGUET, Jacques LEMOINE (1972), *L'alimentation artificielle des nappes souterraines*. París: Ed. Masson & cie.

Ampliatoria

SCHOELLER, H. (1962), *Les eaux souterraines*. París: Ed. Masson & Cie.

TODD, David Keith (1966), *Groundwater Hidrology*. New York: Ed. John Wiley & Sons.

Bibliografía

BANDA TARRADELLAS, Enric (2000), Montserrat TORNÉ ESCASANY: *Geología*. Buenos Aires: Ed. Santillana.

BIZE, Jean, Lucien BOURGUET, Jacques LEMOINE (1972), *L´alimentation artificielle des nappes souterraines*. París: Ed. Masson & cie.

BOSSI, Jorge (2007), *Regiones geológicas del Uruguay*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

BOSSI, Jorge, A. FERNÁNDEZ, G. ELIZALDE, I. FORD (1986), *Tomo III Erosión y transporte*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

BOSSI, Jorge, Lorenzo FERRANDO (2001), *Carta geológica del Uruguay a escala 1/500.000*. Montevideo: Facultad de Agronomía (versión CD).

BOSSI, Jorge, Héctor Luis MORALES (1997), *Perspectivas concretas de agua subterránea en los alrededores del Centro Regional Sur*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

BOSSI, Jorge, Rosa NAVARRO (1991), *Geología del Uruguay*. Montevideo: Universidad de la República, Vol. 1 y 2.

BOSSI, Jorge, Alejandro SCHIPILOV (2007), *Rocas ígneas básicas del Uruguay*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

COMESAÑA, Héctor (1976), *Curso sobre Fotogrametría*. Montevideo: Facultad de Ingeniería.

CORREU, Guillermo (1974), *Manual para el alumbramiento de aguas subterráneas*. México: Ed. FIRA.

DANA, Edward Salisbury, Cornelius S. HURLBUT (1956), *Manual de mineralogía*. Buenos Aires: Ed. Reverté.

DERCOURT, Jean, Jacques PAQUET (1978),*Geología*. Barcelona: Ed. Reverté.

ERNST, W. (1974), *Los materiales de la Tierra*. Barcelona: Ed. Omega.

EVIA, Gerardo, Eduardo GUDYNAS (2000), *Ecología del paisaje en Uruguay. Aportes para la conservación de la diversidad biológica*. Sevilla: Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, Junta de Andalucía, AECI.

FAO (1981), *Contaminación de las aguas subterráneas: tecnología, economía y gestión*. Instituto Geológico y Minero de España, Instituto Geológico de Massachusetts: Ed. FAO.

FORD, I. (1988), *Asociación caolinita-montmorillonita en perfiles tipo de la formación Asencio. Primera reunión de Geología Uruguaya*. Salto: 47-49.

——— (1984), *Dinámica mineral en el suelo, algunos puntos de referencia para su estudio*. México: Universidad Autónoma de Chapingo.

——— (1998), *Introducción a la argilología, ciencia de las arcillas*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

FORD, I; Fernando GANCIO (1990), *Asociación caolinita-montmorillonita en un paleosuelo del Terciario Inferior del Uruguay (Fm. Asencio)*. Montevideo: Bol. Inv. Facultad de Agronomía.

GANCIO, Fernando (1997), *Técnicas de cartografía aplicada en agronomía: Cartas topográficas*. Montevideo: Departamento de Publicaciones. Facultad de Agronomía (Código 450).

GILLULY, James, Aaron WATERS, Alfred WOODFORD (1964), *Principios de geología*. Bilbao: Ed. Aguilar.

GINZBURG, I. J. (1960), *Principles of Geochemical prospecting*. London-New York: Pergamon Press.

GONZÁLEZ, Alice, Nicolás REZZANO, Enrique INDARTE (2008), *Guía de gestión integral de aguas en establecimientos lecheros: diseño, operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento de efluentes*. Montevideo: MTOP-DINAMA-CONAPROLE-IMFIA.

HAUSMAN, Abrao (2003), *Aspectos del comportamiento de los acuíferos fracturados*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

HEINZEN *et al.* (2003), *Mapa hidrogeológico del Uruguay a escala 1/1.000.000*. Montevideo: Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE).

HELLER, Robert, Oswald SOLA (1967), *Geología y ciencias afines*. México: Ed. Uthea.

HOLMES, Arthur (1962), *Geología física*. Barcelona: Ed. Omega.

MELÉNDEZ, Bermudo, José FÚSTER (1984), *Geología*. Madrid: Ed. Paraninfo.

MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGÍA (MIE), DIRECCIÓN NACIONAL DE MINERÍA Y ENERGÍA (Dinamige) (1986), *Elementos del ciclo hidrológico. Memoria explicativa de la Carta Hidrogeológica escala 1/2.000.000*. Montevideo: MIE.

MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS (MTOP), DIRECCIÓN NACIONAL DE HIDROGRAFÍA (DNH) (2001), *Primer Taller del Acuífero Raigón. Gestión sostenible de recursos de aguas subterráneas*. Montevideo: MTOP.

MORALES, Héctor Luis (1996), *Introducción a la hidrogeología*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

MULLER, Roberto (1947), *Compendio general de topografía teórico práctica,* 3 vols. Buenos Aires: Ed. Ateneo.

ORTIZ, Alejandra (2009), *Glosario de geología e hidrogeología*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

PEDRO, Georges (1968), «Distribution des principaux types d'alterations chimiques á la surface du globe. Presentation d'une esquisse geographique.» Revue Geogr. Phys. et Geol. Dynam. X, 5: 457-470.

PETTIJHON, Francis John (1963), *Rocas sedimentarias*. Buenos Aires: EUDEBA.

READ, H., Janet WATSON (1975), *Introducción a la geología*. Madrid: Ed. Alhambra.

RUBE, Kurt (1963), *Fotogrametría*. Barcelona: Ed. Gili.

SCHOELLER, H. (1962), *Les eaux souterraines*. París: Ed. Masson & Cie.

TARDY, Yves (1969), *Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique*. Memoire du Service de la Carte géologique d' Alsace et Lorraine, N° 31. Université de Strasbourg.

TODD, David Keith (1966), *Groundwater Hidrology*. New York: Ed. John Wiley & Sons.

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA, FACULTAD DE AGRONOMÍA (2009), *Geología para ingenieros agrónomos*. Montevideo: Facultad de Agronomía.

VEROSLAVSKY, Gerardo, Martín UBILLA, Sergio MARTÍNEZ (ed.) (2006), *Cuencas sedimentarias del Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales. Paleozoico*. Montevideo: Dirarc..

———— (2004), *Cuencas sedimentarias del Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales. Cenozoico*. Montevideo: Dirarc .

———— (2003), *Cuencas sedimentarias del Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales. Mesozoico*. Montevideo: Dirarc.

Esta publicación cuenta con el apoyo de la Comisión Sectorial de Enseñanza (CSE) de la Universidad de la República (Udelar). Forma parte de la serie «Manuales de aprendizaje» de la CSE, que tiene como objetivo mejorar las condiciones de aprendizaje de los estudiantes y, al mismo tiempo, propiciar la autoformación docente mediante la reflexión sobre sus prácticas y sobre el estado del arte en su disciplina. Secundariamente, esta publicación pretende colaborar en la constitución de tradiciones disciplinares y culturas educativas nacionales.

ISBN: 978-9974-0-0763-5
9 789974 007635